

Einfluss von Exoskeletten als Unterstützung der oberen Extremitäten auf die Belastung / Beanspruchung bei industriellen Arbeitstätigkeiten

Mirko KAUFMANN^{1,2,3}, Volker HARTH¹, Daniel FRIEMERT³, Kai HEINRICH²

¹ *Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Seewartenstraße 10, D-20459 Hamburg*

² *Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung
Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin*

³ *RheinAhrCampus Remagen, Hochschule Koblenz
Joseph-Rovan-Allee 2, D-53424 Remagen*

Kurzfassung: Der Einsatz von Exoskeletten als Assistenzsysteme wird als eine Möglichkeit angesehen, um die Zahl der arbeitsbedingten Ausfalltage aufgrund von Muskel-Skelett-Erkrankungen in den oberen Extremitäten bei Überkopf-Tätigkeiten nachhaltig zu verringern. Im Rahmen einer Querschnittstudie werden industrielle Überkopf-Tätigkeiten analysiert, welche aus ergonomischer Sicht als belastend für die oberen Extremitäten eingestuft werden. Dafür sollen die Tätigkeiten in einer Kontrollbedingung (ohne Exoskelett) und in einer Interventionsbedingung (angelegtes Exoskelett) sowohl von erfahrenen Mitarbeitern/-innen an ausgewählten Arbeitsplätzen als auch von Teilnehmenden im Labor ausgeführt werden. Die muskuloskelettalen Belastungen und Beanspruchungen werden mittels ergonomischer Bewegungsanalyse und physiologischer Verfahren erfasst und analysiert. Auf Basis der Ergebnisse sollen Handlungsempfehlungen für ein sicheres Arbeiten mit Exoskeletten am Arbeitsplatz abgeleitet werden.

Schlüsselwörter: Exoskelette, Muskel-Skelett Erkrankungen, oberen Extremitäten, muskuloskelettale Belastung / Beanspruchung, industrielle Arbeitstätigkeiten

1. Einleitung

Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) hervorgerufen durch Über- und Fehlbelastung des Stütz- und Bewegungssystems werden im Bereich des Arbeitsschutzes und bei den Krankenkassen als häufigste Ursache für arbeitsbedingte Ausfalltage aufgelistet (Hoehne-Hückstädt et al. 2007; Liebers & Caffier 2009; BAuA 2016; Storm 2017). Dabei treten die Hälfte aller MSE in den oberen Extremitäten auf. Die Hauptursache wird auf einen erhöhten Umfang von Überkopf-Tätigkeiten zurückgeführt (Hoehne-Hückstädt et al. 2007; BAuA 2016). Eine Möglichkeit, um die Zahl der Ausfälle aufgrund von arbeitsbedingten MSE der oberen Extremitäten nachhaltig zu verringern, könnte in dem Einsatz von Exoskeletten bestehen (Knye & Otte 2018).

Exoskelette sind orthetische Vorrichtungen, welche extern am Körper angelegt werden. Das Ziel eines Exoskelettes ist die physische Unterstützung durch Umverteilung der Kräfte auf weniger bedenkliche Körperregionen, folglich eine gezielte Entlas-

tung bestimmter Körperregionen des Bewegungsapparates. Sie können je nach Funktionsweise in passiv und aktiv unterteilt werden. Passive Exoskelette besitzen ausschließlich kraftspeichernde oder -umlenkende Elemente wie z. B. Feder- oder Seilzugsysteme. Aktive Exoskelette beinhalten zusätzliche kraftgenerierende Komponenten (Aktuatoren), wie Elektromotoren. In ersten industriellen Piloteinsätzen wurden bereits passive Exoskelette zur Unterstützung der oberen Extremitäten bei Überkopfarbeiten eingesetzt (Meinken 2017; Nördinger 2017; Knye & Otte 2018).

De Looze et al. zeigten in ihrem Reviewpaper, dass nur wenige Studien die Auswirkungen von Exoskeletten auf die physische Belastung der oberen Extremität untersucht haben (De Looze et al. 2015). Es fand sich nur eine Studie, welche die Auswirkungen von Exoskeletten in einer Feldstudie untersuchte (Graham et al. 2009). Viele weitere Studien beschränken sich auf die Untersuchung der elektromyographischen Aktivität ausgewählter Muskelgruppen (u.a. Huysamen et al. 2018; Kim et al. 2018; Theurel et al. 2018). Physiologische Analysen, wie die Untersuchung der Durchblutung der Muskulatur, ergonomische Haltungs-/Bewegungsanalysen, sowie die Analyse biomechanischer Belastungs-Parameter, wie Kräfte und Drehmomente in und an den Gelenken, wurden bisher nur selten durchgeführt.

Es lässt sich beobachten, dass bereits ein fortschreitendes Interesse am Einsatz von Exoskeletten an industriellen Arbeitsplätzen vorliegt (Meinken 2017; Nördinger 2017; Knye & Otte 2018). Allerdings wurden deren Auswirkung auf die Belastung und Beanspruchung arbeitsmedizinisch insgesamt nur unzureichend untersucht (Knye & Otte 2018). Zumeist wurden die umfangreichen Messreihen an Teilnehmenden in einer Laborumgebung durchgeführt.

2. Zweck des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieser Studie ist die Analyse der Wirksamkeit von Exoskeletten für die oberen Extremitäten hinsichtlich der biomechanischen und auf Nutzerangaben basierten muskuloskelettalen Belastung und Beanspruchung bei besonders kritischen industriellen Überkopf-Tätigkeiten. Dafür sollen im Rahmen einer prospektiven Querschnittstudie verschiedene industrielle Überkopf-Tätigkeiten (Niet-, Bohr- und Spanarbeiten an Strukturmontagearbeitsplätzen) analysiert werden, welche aus ergonomischer Sicht als besonders belastend für die oberen Extremitäten eingestuft wurden und bei denen der Einsatz von Exoskeletten als unterstützend und entlastend angenommen werden kann.

Diese Tätigkeiten finden sich z.B. als Überkopf-Arbeiten an dem Strukturmontagearbeitsplatz des Flugzeuges A350 bei der Airbus Operations GmbH in Hamburg. Durch eine simulierte Tätigkeit an einem schematischen Nachbau eines solchen Strukturmontagearbeitsplatzes im Labor der Hochschule Koblenz am Standort Remagen sollen die Hauptbelastungsmerkmale mit Hilfe von dreidimensionaler Bewegungsanalyse quantifiziert werden. An diesem Labor-Aufbau werden die Teilnehmenden Montage-Tätigkeiten unter einer Kontrollbedingung (Baseline Messung ohne Exoskelett) und Interventionsbedingung (mit angelegtem Exoskelett) ausführen (Laborphase).

Weiterhin sollen erfahrenen Mitarbeitern/-innen der Airbus Operations GmbH Montagetätigkeiten in der Strukturmontage des Flugzeuges A350 an den ausgewählten Arbeitsplätzen im Rahmen der normalen innerbetrieblichen Abläufe ebenfalls unter der Kontroll- und Interventionsbedingung durchführen (Feldphase).

Die muskuloskelettalen und subjektiv empfundenen Belastungen werden in beiden Phasen mittels ergonomischer, biomechanischer und physiologischer Verfahren erfasst und analysiert. Ergänzend dazu sollen die Akzeptanz, die Nutzerperspektive und das subjektive Belastungsempfinden der Studienteilnehmenden einbezogen werden. Auf Basis der Ergebnisse aus der Feld- und Laborphase sollen Handlungsempfehlungen für ein sicheres Arbeiten mit Exoskeletten am Arbeitsplatz abgeleitet werden.

3. Methodik

3.1 Studienteilnehmer/innen

An der Studie werden sowohl in der Labor- als auch in Feldphase Personen teilnehmen,

- a) welche die vorgegebenen industriellen Arbeitstätigkeiten ohne Einschränkungen aufgrund von körperlichen Beeinträchtigungen (z. B. Verletzungen oder Vorerkrankung des Bewegungsapparates) durchführen können,
- b) deren Körpermaße in den Bereich der anthropometrischen Vorgaben der einzelnen Exoskelette fallen

In der Laborphase sollen sowohl männliche als auch weibliche Personen aus verschiedenen Altersgruppen und Berufsfeldern (z.B. Handwerker, Büroarbeitskräfte, Studenten) untersucht werden. An der Feldphase werden Mitarbeitern/-innen der Airbus Operations GmbH teilnehmen.

3.2 Messinstrumente

Für die ergonomische Analyse sollen Haltungs-/Bewegungsdaten anhand bestehender ergonomischer Richtlinien beurteilt werden. Die messtechnische Erfassung der Bewegungsdaten im Labor soll mit dem markerbasierten Motion Capture System Qualisys (Qualisys AB, Göteborg, Schweden) erfolgen. Für die Feldphase wird das CUELA-System genutzt (Ellegast et al. 2010). Mithilfe der erfassten Bewegungsdaten sollen digitale biomechanische Menschmodelle angetrieben und mit ihrer Hilfe biomechanische Belastungsparameter an ausgewählten Gelenken bestimmt werden.

Durch die Erfassung der muskulären Aktivität mittels Oberflächenelektromyographie können Aussagen über die Beanspruchung der Muskulatur getroffen werden. Ergänzend dazu soll die Herzfrequenz der Teilnehmenden mittels Herzfrequenzuhr aufgezeichnet werden. Zusätzlich soll in den Labormessungen das Nahinfrarotspektroskopie-Verfahren (NIRS) zur Erfassung der Sauerstoffsättigung und der Durchblutung ausgewählter Muskelgruppen eingesetzt werden.

In der Feldphase sollen vor dem Einsatz der Exoskelette am Arbeitsplatz medizinische Daten zu orthopädischen Vorerkrankungen der Teilnehmenden durch die Betriebsärzte der Firma Airbus erfasst werden.

In der Studie sollen verschiedene Exoskelette untersucht werden, welche für die Unterstützung der oberen Extremitäten entwickelt wurden.

Die subjektive Belastung und Akzeptanz sollen von den Teilnehmenden im Rahmen einer Selbsteinschätzung mit Hilfe von standardisierten Fragebögen erhoben werden. Die in dieser Studie verwendeten Fragebögen enthalten sowohl selbst formulierte Fragen, als auch Abschnitte aus bereits bestehenden Fragebögen (u.a. dem Nordischen Fragebogen über Beschwerden am Bewegungsapparat, dem SLESINA-

Fragebogen zur subjektiven Einschätzung der Belastung am Arbeitsplatz und die Kurzversion des „Work Ability Index/Arbeitsbewältigungsindex (WAI)“).

3.3 Messprotokoll

Die Teilnehmenden sollen in der Studie verschiedene Über-Kopf-Montage-tätigkeiten (Niet-, Bohr- und Spanarbeiten) unter der Kontrollbedingung und der Interventionsbedingung ausführen. Um Verzerrungen aufgrund der Messwiederholungen zu reduzieren, wird die Reihenfolge der verschiedenen Tätigkeiten, als auch die Reihenfolge der Interventionen für jeden Teilnehmenden randomisiert.

Für die Feldphase werden die Mitarbeiter/-innen an insgesamt drei Messzeitpunkten untersucht. Dafür werden sie am ersten Untersuchungstag (Eingangsuntersuchung) die oben beschriebene biomechanische Bewegungs- und Belastungsuntersuchung am Arbeitsplatz durchlaufen. Nach einer dreimonatigen Interventionszeit werden sie mittels Fragebögen zur Bewertung der empfundenen Belastung befragt. Nach einer weiteren dreimonatigen Interventionszeit werden die Teilnehmenden in einer Ausgangsuntersuchung ebenfalls wie oben beschrieben biomechanisch untersucht.

Für die Laborphase ist für die Teilnehmenden nur ein Messzeitpunkt vorgesehen.

3.4 Geplante Auswertung der Messungen und Fragebögen

Zunächst werden die Messdaten und Angaben, die in Fragebogen erhoben werden, deskriptiv aufbereitet. Die Angaben aus der Labor- und Feldphase werden zunächst getrennt ausgewertet. Die verschiedenen Arbeitsverfahren und Exoskelette sollen hinsichtlich der objektiven Belastungsgrößen, der subjektiven Belastung und der Akzeptanz in vergleichenden Untersuchungen mit Messwiederholungen (repeated measures ANOVA Analysen) analysiert werden.

Für die Feldphase wird das subjektive Belastungsempfinden zusätzlich an jeden Messzeitpunkt erfasst und analysiert.

4. Aktueller Stand des Projektes

In einer Pilotstudie im Labor werden momentan erste Messungen an einem Testaufbau durchgeführt. Die Hauptmerkmale für den Testaufbau wurden der Tätigkeitsbeschreibung eines realen Arbeitsplatzes bei der Airbus Operations GmbH in Hamburg nachempfunden, an welchem Längsnahtbohrungen an der Unterschale des Flugzeuges A350 durchgeführt werden. Die auszuführende Tätigkeit wurde angelehnt an Sood et al. (2007).

Die Teilnehmenden sollen einhändig einen Akkuschrauber an einem schräg überkopf montierten Brett nacheinander an insgesamt 20 mit Zahlen markierten Feldern andrücken und für insgesamt 4 Sekunden halten. Nach 5 Sekunden erhalten die Teilnehmenden mittels einer neuen Zahl die Zuweisung für das nächste Feld, an welches sie den Akkuschrauber anführen und andrücken sollen. Die Teilnehmenden werden angewiesen zwischen dem Wechsel eines Feldes den Arm oben zu halten und nicht abzusetzen. Insgesamt sollen alle 20 Felder abgearbeitet werden. Dieser Vorgang wird innerhalb jeder Messung 5-mal durchgeführt mit einer 2-minütigen Pause zwischen den Vorgängen. Während der Pausen sollen die Teilnehmenden die Arme absetzen. Die Reihenfolge der Zahlen wurde im Vorfeld randomisiert und bleibt

für die gesamte Pilotstudie für alle Messungen und alle Teilnehmenden gleich. Jeder Teilnehmenden führt insgesamt zwei Messungen jeweils einmal unter der Kontrollbedingung und einer Interventionsbedingung durch.

Während der Messungen werden die Bewegungen der Teilnehmenden, des Exoskelettes und des Akkuschraubers mit dem markerbasierten Motion Capture System Qualisys (Qualisys AB, Göteborg, Schweden) bestehend aus 8 - Infrarotkameras der 7+ Serie aufgezeichnet. Zusätzlich wird die Durchblutung des linken und rechten Musculus deltoideus mit Hilfe des Tiefengewebeoxygenierungs-Monitors „moorVMS-NIRS“ (Moor Instruments GmbH, Köln, Deutschland) gemessen. Die Kräfte, welche beim Andrücken des Akkuschraubers auf das Brett erzeugt werden, werden mit Hilfe des eindimensionalen DMS-Kraftsensors „KM30z“ (ME-Meßsysteme GmbH, Hennigsdorf, Deutschland) aufgezeichnet, welcher an der Spitze des Schraubers montiert wurde. Nach jeder Messung sollen die Teilnehmenden in Form von Fragebögen die von ihnen subjektiv empfundene Belastung und Beanspruchung während den Messungen sowie eine Bewertung des Exoskelettes abgeben. In der Pilotstudie wird das Exoskelett „Paexo“ (OttoBock HealthCare GmbH, Duderstadt, Deutschland) untersucht.

Zeitgleich mit den Messungen wird ein Modell des untersuchten Exoskelettes für die biomechanische Simulation der anliegenden Kräfte und Drehmomente innerhalb der Software „OpenSim“ angefertigt.

5. Literatur

- BAuA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2016) Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Berufsjahr 2016. Unfallverhütungsbericht Arbeit.
- De Looze M, Bosch T, Krause F, Stadler K, O'Sullivan L (2015) Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59: 1-11.
- Ellegast RP, Hermanns I, Schiefer C (2010) Feldmesssystem CUELA zur Langzeiterfassung und – analyse von Bewegungen an Arbeitsplätzen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 64, Nr. 2, 101-110.
- Graham RB, Agnew MJ, Stevenson JM (2009) Effectiveness of an On-body Lifting Aid at Reducing Low Back Physical Demands during an Automotive Assembly Task: Assessment of EMG Response and User Acceptability. *Applied Ergonomics* 40 (5): 936–942.
- Hoehne-Hückstädt U, Herda C, Ellegast R, Hermanns I, Hamburger R, Ditchen D (2007) Muskel-Skelett-Erkrankungen der oberen Extremität und berufliche Tätigkeit. BGI Report 2.
- Huysamen K, Bosch T, De Looze M, Stadler KS, Graf E, O'Sullivan LW (2018) Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics* 70: 148-155.
- Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MIM, Alemi MM, Alabdulkarim S, Rashedi E (2018) Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics* 70: 315-322.
- Knye M, Otte A (2018) Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen (II) - Chancen und Risiken aus betrieblicher Sicht. Präsentation Volkswagen Aktiengesellschaft.
- Liebers F, Caffier G (2009) Berufsspezifische Arbeitsunfähigkeit durch Muskel-Skelett-Erkrankungen in Deutschland. Abschlussbericht zum Projekt „Berufs- und diagnosebezogene Auswertung von Arbeitsunfähigkeitsdaten der gesetzlichen Krankenkassen“ – Projekt F 1996 – der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Meinken T (2017) Exoskelett entlastet Arbeiter in BMW-Werken. In: Blue Rocket. Accessed April 9, 2018. <http://blue-rocket.de/exoskelett-entlastet-arbeiter-im-us-bmw-werk-spartanburg/>.
- Nördinger S (2017) Produktion – Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie: Exoskelette verleihen Superkräfte. Accessed April 09, 2018. <https://www.produktion.de/trends-innovationen/exoskelette-verleihen-superkraefte-226.html>.
- Sood D, Nussbaum MA, Hager K (2007) Fatigue during prolonged intermittent overhead work: reliability of measures and effects of working height. *Ergonomics* 50: 497-513.

- Storm A (2017) DAK Gesundheitsreport 2017 - Analyse der Arbeitsunfähigkeitsdaten. In: Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung (Band 16).
- Theurel J, Desbrosses K, Roux T, Savescu A (2018) Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics* 67: 211-217.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten

65. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Professur Arbeitswissenschaft
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden

Institut für Arbeit und Gesundheit
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

27. Februar – 1. März 2019

GfA-Press

Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019

**Professur Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,
Technische Universität Dresden;
Institut für Arbeit und Gesundheit, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Dresden**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2019
ISBN 978-3-936804-25-6

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 Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband 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

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de