

Objektivierung der physiologischen Kosten bei Überkopfarbeiten mit und ohne passivem Oberkörperexoskelett

Sandra GROOS, Nils Darwin ABELE, Petra FISCHER, Karsten KLUTH

*Arbeitswissenschaft/Ergonomie
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Straße 9-11, D-57068 Siegen*

Kurzfassung: Obwohl die moderne Arbeitswelt eine Reduktion manueller Tätigkeiten bei gleichzeitigen Automatisierungserfolgen aufweist, werden auch zukünftig Arbeiten in Zwangshaltungen, wie z.B. die Überkopfarbeit, zu verrichten sein. Oberkörperexoskelette, welche die oberen Extremitäten und die Rückenmuskulatur entlasten sollen, können für den Einsatz an derartigen Arbeitsplätzen als sinnvoll angesehen werden. Allerdings sind zunächst der physiologische Nutzen sowie mögliche Risiken im täglichen Gebrauch grundlegend zu evaluieren. Um die Belastung und Beanspruchung bei verschiedenen Überkopftätigkeiten mit und ohne Exoskelett zu objektivieren, wurde eine Laborstudie mit 20 Probanden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz des Exoskeletts Airframe® des Herstellers Levitate insbesondere eine verminderte muskuläre Aktivität der Schulter- und Nackenmuskulatur begünstigt.

Schlüsselwörter: Exoskelett, Überkopfarbeit, Herzschlagfrequenz, Oberflächen Elektromyographie, Physiologische Kosten, Muskuloskelettale Erkrankungen

1. Einleitung und Stand der Forschung

In industriellen Fertigungsprozessen können Roboter Aufgaben übernehmen, die große Kräfte erfordern. Neben für Roboter – aufgrund von beispielweise konstruktiven Gegebenheiten – ungeeigneten Arbeitsumgebungen können aber auch die von Otten et al. (2016) beschriebenen menschlichen Fähigkeiten Sensorik, Kognition, Flexibilität und Lernfähigkeit für eine Arbeitsaufgabe verlangt werden. Dieser Sachverhalt bedingt, dass der Mensch nach wie vor Tätigkeiten ausführen muss, die eventuell unter Zwangshaltungen erfolgen und dann in physiologisch ungünstigen Körperhaltungen zu verrichten sind. Arbeiten in gebückter, hockender, kniender oder liegender Stellung zählen ebenso wie Arbeiten über Kopf zu den Zwangshaltungen. Im Jahr 2018 waren 16,6% der Vollzeitbeschäftigten häufig von Arbeiten in Zwangshaltungen betroffen, wovon wiederum 39% Überkopfarbeiten durchführten und 51,6% diese als belastend empfanden. In Abhängigkeit der Häufigkeit, Dauer und Intensität der Zwangshaltung sind gesundheitliche Folgen absehbar (Lück et al., 2019). Eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung ist daher zwingend erforderlich, um die Gesundheit des Arbeitnehmers und damit auch seine Arbeitsfähigkeit langfristig zu erhalten.

Eine Unterstützungsmöglichkeit ist der Einsatz von Exoskeletten. Für Überkopftätigkeiten sind insbesondere Oberkörperexoskelette geeignet, welche die oberen Extremitäten und den Rücken zugunsten einer Belastungsreduktion der Schultern und der Rückenmuskulatur in ungünstigen Körperhaltungen unterstützen sollen. Aufgrund

der Neuartigkeit der Exoskelette bestehen noch keine Erfahrungen im langfristigen Einsatz. Lediglich wissenschaftliche Kurzzeitstudien können erste Anhaltspunkte sowohl über den Nutzen als auch über die möglichen Risiken liefern. Aufgrund der hohen Produktvarianz innerhalb der Exoskelette liegen für ausgewählte Modelle nur sehr wenige Studien vor. Das hier betrachtete Oberkörperexoskelett Airframe[®] des Herstellers Levitate wurde bisher in Studien von Butler & Gillette (2019), Gillette & Stephenson (2018), Kim et al (2018a,b), Liu et al. (2017) sowie Spada et al. (2017) evaluiert. Trotz des noch nicht umfänglichen wissenschaftlich fundierten Wissens über die Wirkungsweise von Exoskeletten, werden diese bereits häufiger in der Industrie – insbesondere in der Automobilindustrie – eingesetzt. So gehört das Airframe[®] im Toyota-Werk Woodstock (Kanada) bereits zur verpflichtenden Sicherheitsausrüstung (Marinov 2018). Um das Grundlagenwissen über Nutzen und Risiken industrieller Exoskelette weiter auszubauen, sollten die physiologischen Kosten bei Überkopfarbeiten mit und ohne Exoskelett durch eine standardisierte Laborstudie objektiviert werden.

2. Methodik

Für die Laborstudie wurde ein Probandenkollektiv von 20 freiwilligen erwachsenen und gesunden Versuchspersonen (9 Männer, 11 Frauen, \bar{x} 31,9 \pm 13,4 Jahre, 178 \pm 7 cm Körpergröße, 79,6 \pm 16,6 kg Körpermasse) ausgewählt, die keinerlei Erfahrungen im Umgang mit dem Oberkörperexoskelett Airframe[®] von Levitate aufwiesen. Im Zuge der Versuchsdurchführung absolvierten die Probanden entsprechend des in Abbildung 1 dargestellten Versuchsablaufs simulierte Montagearbeiten, die eine Schraubtätigkeit von Hand und mit Akkuschauber sowie eine Stecktätigkeit mit Lego[®]-Bausteinen jeweils mit und ohne Exoskelett beinhalteten. Die Versuche wurden durch eine Zeichenübung ergänzt, um hieraus Erkenntnisse über die Präzision der Tätigkeitsausführung zu gewinnen. Im Ergebnisteil wird dieser Teilversuch allerdings nicht weiter berücksichtigt.

Um Gewohnheitseffekten vorzubeugen, wurden sowohl die Teilversuche untereinander als auch die Tätigkeiten innerhalb der Versuche randomisiert. Des Weiteren wurden die Probanden dazu angehalten, in einem vorgegebenen Zeitfenster in Abhängigkeit eines akustisch erzeugten Taktes die Schrauben und Lego[®]-Bausteine gemäß eines fest definierten Schemas anzubringen. Nach jedem Durchlauf wurde innerhalb einer Erholungspause die gegenwärtige, physische Verfassung mithilfe eines einfachen Körperschaubildes erfasst und die subjektive Wahrnehmung in Interviewform abgefragt.

Zur Objektivierung der physiologischen Kosten wurden die Herzschlagfrequenz (HSF) sowie die muskuläre Aktivität der Muskeln m. trapezius p. descendens, m. deltoideus p. clavicularis, m. deltoideus p. acromialis sowie m. latissimus dorsi auf beiden Körperhälften mittels Oberflächenelektromyographie (OEMG) kontinuierlich unter variablen Testbedingungen erfasst.

Schrauben von Hand	Schrauben mit Akkuschauber	Stecktätigkeit
		
Taktvorgabe: 100 bpm 6x eine Schraube mit der rechten Hand eindrehen 5 min Kurzpause, Abfrage Schaubild 6x eine Schraube mit der linken Hand eindrehen 10 min Kurzpause, Abfrage Schaubild und Fragebogen Ende Teilversuch	Keine Taktvorgabe 7x eine Reihe (à 7 Schrauben) mit der Arbeitshand 10 min Kurzpause, Abfrage Schaubild und Fragebogen Ende Teilversuch	Taktvorgabe: 30 bpm 8x vier Legosteine mit rechter Hand 5 min Kurzpause, Abfrage Schaubild 8x vier Legosteine mit linker Hand 10 min Kurzpause, Abfrage Schaubild und Fragebogen Ende Teilversuch

Abbildung 1: Darstellung der drei Teilversuche (Schrauben von Hand und mit Akkuschauber sowie Stecken von Lego®-Bausteinen) mit detaillierter Beschreibung der zeitlichen Aufteilung innerhalb eines Teilversuches

3. Ergebnisse

3.1 Herzschlagfrequenz

Die während der Versuchsdauer kontinuierlich erfasste HSF und die daraus errechneten Arbeitspulse zeigten geringfügige Unterschiede zwischen den Versuchsvariablen mit und ohne Exoskelett (vgl. Tab. 1 und 2). Der zweiseitige t-Test ergab beim Schrauben von Hand (linke Hand) sowie bei den Stecktätigkeiten mit rechter und linker Hand zwischen der Anwendung mit und ohne Exoskelett signifikante Unterschiede. Bei allen anderen Teilversuchen sind die Unterschiede nicht signifikant. Entsprechend der Hypothesenbildung kann damit für die Teilversuche, in denen es zu signifikanten Unterschieden kam, eine kardiovaskuläre Entlastung durch das Exoskelett während der Überkopftätigkeit nachgewiesen werden.

Tabelle 1: Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1%) der Arbeitspulse in Schläge pro Minute (min^{-1}) über alle Versuchspersonen ($n=20$) für die Teilversuche Schrauben von Hand (jeweils linke und rechte Hand) sowie Schrauben mit Akkuschauber (nur Arbeitshand) mit den Versuchsvariablen ohne und mit Exoskelett (oE, mE).

	Schrauben von Hand (rechte Hand)		Schrauben von Hand (linke Hand)		Schrauben mit Akkuschauber	
	oE	mE	oE	mE	oE	mE
M	31,1	30,0	31,7	30,2	25,7	25,0
SD	±1,1	±0,6	±2,2	±1,4	±2,5	±2,2
Signifikanz	nicht signifikant (-)		signifikant (*)		nicht signifikant (-)	

Tabelle 2: Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1%) der Arbeitspulse in Schläge pro Minute (min^{-1}) über alle Versuchspersonen ($n=20$) für den Teilversuch Stecktätigkeit (jeweils linke und rechte Hand) mit den Versuchsvariablen ohne und mit Exoskelett (oE, mE).

	Stecktätigkeit (rechte Hand)		Stecktätigkeit (linke Hand)	
	oE	mE	oE	mE
M	24,9	22,4	26,3	23,3
SD	$\pm 1,4$	$\pm 1,1$	$\pm 1,7$	$\pm 1,3$
Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)	

3.2 Oberflächenelektromyographie

Die erfasste muskuläre Aktivität der Muskeln m. trapezius p. descendens, m. deltoideus p. clavicularis, m. deltoideus p. acromialis sowie m. latissimus dorsi zeigte an beiden Körperhälften vergleichbare Werte. Mit Ausnahme des m. latissimus dorsi ist für die sonstigen Muskelstellen während der Teilversuche ein signifikanter Unterschied bei einer 0,1-prozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen der Tätigkeitsausführung mit und ohne Exoskelett erkennbar (vgl. Tab. 3 und 4). Insgesamt konnte die standardisierte elektromyographische Aktivität (sEA) durch das Exoskelett um ca. vier bis sechs Prozent reduziert werden. Der rechtsseitige m. latissimus dorsi zeigte hingegen als Antagonist der drei zuvor genannten Muskeln keine signifikanten Veränderungen beim Arbeiten mit und ohne Exoskelett. Beim linksseitigen m. latissimus dorsi waren die Unterschiede beim Schrauben von Hand (rechte und linke Hand), beim Schrauben mit Akkuschauber und bei der Stecktätigkeit mit der linken Hand signifikant. Allerdings wies diese Muskelstelle mit ein bis zwei Prozent geringfügig niedrigere Werte beim Arbeiten mit dem Exoskelett auf.

Tabelle 3: Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1%) der standardisierten elektromyographischen Aktivität (sEA) in Prozent der rechtsseitig erfassten Muskeln und über alle Versuchspersonen ($n=20$) für die Teilversuche Schrauben von Hand (jeweils linke und rechte Hand) sowie Schrauben mit Akkuschauber (nur Arbeitshand) mit den Versuchsvariablen ohne und mit Exoskelett (oE, mE).

		Schrauben von Hand (rechte Hand)		Schrauben von Hand (linke Hand)		Schrauben mit Akkuschauber	
		oE	mE	oE	mE	oE	mE
m. trapezius	M	17,7	12,4	16,3	10,7	19,7	15,3
	SD	$\pm 1,5$	$\pm 0,6$	$\pm 1,3$	$\pm 0,6$	$\pm 1,6$	$\pm 1,0$
	Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)		signifikant (*)	
m. clavicularis	M	23,2	18,3	16,4	12,3	23,1	17,4
	SD	$\pm 1,8$	$\pm 1,3$	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 2,8$	$\pm 2,5$
	Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)		signifikant (*)	
m. acromialis	M	14,6	9,9	10,2	6,3	12,4	7,5
	SD	$\pm 1,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,4$	$\pm 0,9$
	Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)		signifikant (*)	
m. latissimus	M	7,1	6,8	4,6	4,9	6,6	6,4
	SD	$\pm 1,2$	$\pm 1,3$	$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	$\pm 2,1$	$\pm 1,4$
	Signifikanz	nicht signifikant (-)		nicht signifikant (-)		nicht signifikant (-)	

Tabelle 4: Mittelwerte, Standardabweichungen und Signifikanzen der standardisierten elektromyographischen Aktivität (sEA) in % aller rechtsseitig erfassten Muskeln und über alle Versuchspersonen (n=20) für den Teilversuch Stecktätigkeit (jeweils linke und rechte Hand) mit den Versuchsvariablen ohne und mit Exoskelett (oE, mE).

		Stecktätigkeit (rechte Hand)		Stecktätigkeit (linke Hand)	
		oE	mE	oE	mE
m. trapezius	M	16,6	11,4	12,9	8,5
	SD	±4,0	±2,1	±2,9	±1,9
	Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)	
m. clavicularis	M	17,3	11,3	10,6	6,7
	SD	±4,5	±2,4	±3,5	±2,2
	Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)	
m. acromialis	M	10,1	6,5	6,1	3,8
	SD	±3,2	±1,5	±1,9	±1,0
	Signifikanz	signifikant (*)		signifikant (*)	
m. latissimus	M	4,9	5,2	5,1	5,2
	SD	±1,4	±1,1	±0,9	±0,9
	Signifikanz	nicht signifikant (-)		nicht signifikant (-)	

4. Diskussion

Wie die Ergebnisse aus der Herzfrequenzanalyse zeigen, kann die Verwendung des Exoskelettes stellenweise die Höhe der Arbeitspulse und damit die Beanspruchung auf das kardiovaskuläre System reduzieren. Betragsmäßig ist die Reduzierung allerdings vernachlässigbar klein. Aufgrund der Tatsache, dass die Arbeitspulse mit 22 bis knapp 32 Schlägen pro Minute deutlich unterhalb der Dauerleistungsgrenze von 40 Schlägen pro Minute (bei einer Ruhepulserfassung im Liegen) lagen, sind diese kaum von Relevanz.

Viel interessanter erscheint im Hinblick auf die eingangs beschriebene Problematik der Folgen physiologisch ungünstiger Zwangshaltungen auf das Muskel-Skelett-System die signifikante Reduzierung der muskulären Aktivität der relevanten Schulter- und Nackenmuskulatur während aller Teilversuche. Die ursprünglich vermutete stärkere Beanspruchung des m. latissimus dorsi bei der Verwendung des Exoskelettes, insbesondere beim kaudalen Absenken der Arme gegen die Unterstützungskraft des Exoskelettes, konnte nicht nachgewiesen werden. Somit hat die Verwendung des Exoskelettes zumindest in Bezug auf den genannten Muskel keine negativen Auswirkungen.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kann dem untersuchten Exoskelett durchaus eine unterstützende und damit entlastende Wirkung zugesprochen werden, wenngleich es sich um eine erste Untersuchung handelte, die auch einige Schwachstellen offenbarte.

Die größte Herausforderung bestand in der vorschriftmäßigen und korrekten Applikation der OEMG-Elektroden, insbesondere hinsichtlich des m. trapezius p. descendens durch die Lage der Schultergurte des Exoskelettes über dem Muskel. Aber auch ungünstige physiologische Gegebenheiten der Probanden, beispielsweise kleine und besonders schmale Personen, erschwerten die elektromyographische Messung unter Verwendung des Exoskelettes. Trotz aller Bemühungen zur Standardisierung der Ver-

suche hinsichtlich der Körper- und Handhaltung sowie der Arbeitsgeschwindigkeit wurden Abweichungen zwischen den Probanden aber auch während der Messungen mit einem Probanden bei unterschiedlichen Versuchsvariablen festgestellt. Dennoch ist die vorliegende Untersuchung ein erster Wegweiser zur Bewertung des Nutzens und etwaiger Limitationen industrieller Exoskelette bzw. Oberkörperexoskelette, die den arbeitenden Menschen bei Überkopfarbeit entlasten sollen.

Da die Versuche mit einer inzwischen technisch überholten Version des Airframe® von Levitate durchgeführt wurden, ist eine Wiederholung der Versuche mit dem aktuellsten Modell und einem größeren Probandenkollektiv sinnvoll. Ebenso scheint eine Variation der Arbeitslänge und die Verwendung weiterer Modelle industrieller Oberkörperexoskelette zur Unterstützung der Schulter- und Nackenmuskulatur bei Überkopfarbeiten zur Stärkung der Aussagekraft gewonnener Erkenntnisse geeignet.

5. Literatur

- Butler T, Gillette JC (2019) Exoskeletons: Used as PPE for Injury Prevention. *Professional Safety* 3: 33-37.
- Gillette JC, Stephenson ML (2018) EMG analysis of an upper body exoskeleton during automotive assembly. 42nd Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, Rochester, MN, USA.
- Kim S, Nussbaum, MA, Esfahani MIM, Alemi MM, Alabdulkarim S, Rashedi E (2018a) 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.
- Kim S, Nussbaum, MA, Esfahani MIM, Alemi MM, Jia B, Rashedi E (2018b) Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II- „Unexpected“ effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied Ergonomics* 70:323-330.
- Liu S, Hemming D, Luo RB, Reynolds J, DeLong JC, Sandler BJ, Jacobsen GR, Horgan S (2018) Solving the surgeon ergonomic crisis with surgical exosuit. *Surgical endoscopy* 32:236-244.
- Lück M, Hünefeld L, Brennscheidt S, Bödefeld M, Hünefeld A (2019) Grundauswertung der BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2018. 2. überarbeitete Auflage, Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg).
- Marinov B (2018) Toyota's Woodstock Plant Makes the Levitate AIRFRAME Exoskeleton Mandatory Personal Protective Equipment. Exoskeleton Report, <https://exoskeletonreport.com/2019/02/toyotas-woodstock-plant-makes-the-levitate-airframe-exoskeleton-mandatory-personal-protective-equipment/>, abgerufen am 07.01.2020.
- Otten B, Weidner R, Linnenberg C (2016) Leichtgewichtige und inhärent biomechanisch kompatible Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe. In: Weidner R (Hrsg.) Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Zweite Transdisziplinäre Konferenz, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 495-505.
- Spada S, Ghibaud L, Gilotta S, Gastaldi L, Cavatorta MP (2017) Investigation into the applicability of a passive upper-limb exoskeleton in automotive industry. *Procedia Manufacturing* 11:1255-1262.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

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 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.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de