

Evaluierung des physiologischen Nutzens eines Oberkörper-Exoskeletts unter Berücksichtigung der Drehmomentbelastung der Schulter während simulierter Überschulterarbeiten

Nils Darwin ABELE, Moritz BRÜCHER, Karsten KLUTH

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

Kurzfassung: Mit dem technologischen Fortschritt nimmt in der modernen Arbeitswelt die Anzahl manueller Tätigkeiten stetig ab, dennoch werden auch in Zukunft einzelne in Zwangshaltungen auszuführende Arbeitselemente verrichtet, wie z. B. Überschulterarbeiten. Oberkörper-Exoskelette tragen zur Entlastung der oberen Extremitäten sowie der Schulter- und Rückenmuskulatur des Anwenders im Zuge der Durchführung von Tätigkeiten auf und über der Schulterhöhe des Menschen bei. In diesem Zusammenhang sind zunächst physiologische Kosten und Gebrauchsrisiken zu evaluieren. Insbesondere hinsichtlich der normativen Bewertung der Schultergelenkbelastung besteht zum aktuellen Zeitpunkt Forschungsbedarf. Zur Einschätzung etwaiger Gefährdungen von Überschulterarbeiten wurde im Rahmen einer Laborstudie eine bewegungstechnische Analyse mit 20 männlichen Probanden durchgeführt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einsatz des passiven Oberkörper-Exoskeletts „Paexo Shoulder“ des Herstellers Ottobock zur Reduzierung der Schulterdrehmomentbelastung während einfacher Montagetätigkeiten und statischer Haltearbeit in verschiedenen Arbeitshöhen auf und über Schulterniveau beiträgt.

Schlüsselwörter: Exoskelett, Gefährdungsbeurteilung, Motion Capturing, Muskuloskelettale Erkrankungen, Schultergelenkbelastung, Überkopfarbeit

1. Einleitung und Stand der Forschung

Die Mechanik des Schultergelenks ist im Vergleich zu anderen Gelenken des menschlichen Körpers deutlich komplexer. Über die Arme, die durch Überkopfarbeiten bzw. Arbeitstätigkeiten auf oder über Schulterhöhe in etwaigen Zwangshaltungen und in regelmäßiger Frequenz mindestens auf Höhe des Gesichtsfelds vor dem Körper gehalten werden, wirken unterschiedlich große Kräfte auf das Schultergelenk ein. Durch die Bewegungsmöglichkeiten in frontaler, transversaler oder sagittaler Ebene sind die auftretenden Belastungen zudem vielfältig. Gesundheitliche Folgen sind in Abhängigkeit der Häufigkeit, Dauer und Intensität der Zwangshaltung absehbar (Lück et al. 2019). Der ärztliche Sachverständigenbeirat Berufskrankheiten beim Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) hat im Dezember 2021 eine wissenschaftliche Begründung für die Berufskrankheit „Läsion der Rotatorenmanschette der Schulter [...]“ für die Anlage 1 der Berufskrankheiten-Verordnung verfasst (BMAS 2021). Schulterbeschwerden und -überlastungen aufgrund von Arbeiten auf oder über Schulterniveau, repetitive Bewegungen im Schultergelenk oder Kraftanwendungen im

Schulterbereich stellen zunehmend Ursachen für Arbeitsausfälle dar. Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) hat zur Bewertung physischer Belastungen für das Schultergelenk auftretende Gelenkmomente bei verschiedenen Winkelbereichen unterschiedliche Risikostufen kategorisiert (DGUV Information 208–333 2016). Jedoch wurden dabei Parameter, wie die Belastungsdauer, der Einfluss äußerer Faktoren, beispielsweise durch werkzeugspezifische Zusatzgewichte, und die Häufigkeit der Arbeitsausführung, nicht berücksichtigt. Daher besteht aktuell ein verstärkter Forschungsbedarf zur quantitativen Bewertung von Schultermomenten. Als Richtwerte für die Bewertung des Schultergelenkmoments werden – summiert für beide Schultergelenkmomente – Gelenkmomente in einem risikominimalen Bereich bis 40 Nm, in einem Bereich mit einem (noch) beherrschbaren Risiko zwischen 40 und 120 Nm und in einem kritischen Bereich über 120 Nm angenommen.

Im Rahmen einer Abschlussarbeit an der Universität Skövde (Schweden) wurden die biomechanischen Auswirkungen eines passiven Oberkörper-Exoskeletts untersucht (Rubio & Quiles 2019). Dabei konnten erste Erkenntnisse zu Auswirkungen auf die Schultergelenke gewonnen und festgestellt werden, dass die Verwendung von Oberkörper-Exoskeletten bei (simulierten) Überkopfarbeiten zu einer Verbesserung der Momentenreduktion am Schultergelenk führen kann. Zwar wurde für die Evaluierung des Produkts das Motion-Capturing-Systems „Xsens“ zusammen mit dem biomechanischen Messsystem („Industrial Athlete“) der Firma Scalefit verwendet, eine softwareunterstützte bzw. simulierte Messung des Schultermoments erfolgte in Kombination mit dem Exoskelett jedoch nicht. Inwieweit die Nutzung eines Oberkörper-Exoskeletts tatsächlich zu einer Minderung der Drehmomentbelastung der Schulter führen kann, sollte in einer standardisierten Laborstudie objektiviert werden. Die Ergebnisse sollen aufgrund der aktuell fehlenden Norm- und Richtlinienbezüge in diesem Zusammenhang wichtige wissenschaftliche und praxisnahe Erkenntnisse liefern.

2. Methodik

Auf Grundlage der beschriebenen Erkenntnisse wurde durch eine Kooperation von Scalefit und Ottobock eine auf elektromyographischen Messungen beruhende Datenbasis geschaffen, die eine digitale Implementierung des Ottobock-Exoskeletts „Paexo Shoulder“ in die Scalefit-Software ermöglichte. Somit konnten unterschiedliche Unterstützungsgrade des Exoskeletts und daraus resultierende Auswirkungen auf den Nutzer simuliert sowie analysiert und schließlich realitätsnahe Ergebnisse produziert werden. In diesem Zusammenhang sollte zunächst identifiziert werden, bei welchen Körperhaltungen die größten Schultermomente bzw. die größten Drehmomentbelastungen auftreten.

Im Zuge der Forschungsarbeit wurde demnach ergänzend zur Studie von Rubio & Quiles (2019) evaluiert, inwiefern das Oberkörper-Exoskelett bei verschiedenen Unterstützungsgraden (25 % bzw. 12,8 N, 37,5 % bzw. 14,1 N, 50 % bzw. 15,5 N, 62,5 % bzw. 16,9 N und 75 % bzw. 18,4 N) dazu beitragen kann, die Drehmomentbelastung der Schulter bei dynamischen Arbeitstätigkeiten, d. h. Schraubtätigkeiten ohne und mit Montagehilfsmittel bzw. Akkuschrauber bei unterschiedlichen Arbeitsstellungen bzw. Schulterauslenkungen und während statischer Haltearbeit zu verringern (vgl. Abbildung 1).

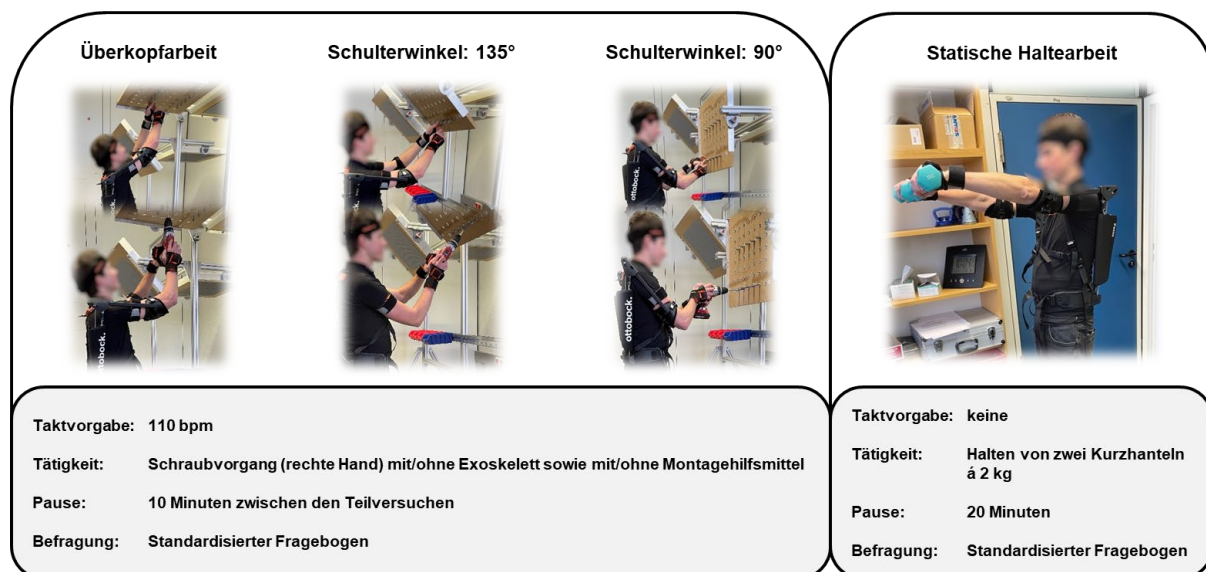


Abbildung 1: Darstellung der Teilversuche bzw. der unterschiedlichen Belastungssituationen für die Schultergelenke während dynamischer Schraubtätigkeiten und statischer Haltearbeit.

Um keine Gewöhnheitseffekte zu erzeugen, wurden die Tätigkeiten randomisiert. Die Versuchsteilnehmer waren in Bezug auf die Montagetätigkeit zudem angehalten, die sechs Schrauben in vorgegebenen Zeitfenstern (händische Schraubtätigkeit: 60 Sekunden; Schraubtätigkeit mithilfe des Akkuschaubers: 30 Sekunden), gemäß einem vordefinierten Schema und in Abhängigkeit eines akustisch erzeugten Taktes (110 bpm) anzubringen. Die statische Haltearbeit, bei der für 30 Sekunden zwei Kurzhanteln mit einem Gewicht von je 2 kg gehalten werden sollten, erfolgte in einer um 90° vom Rumpf abgespreizten Positionierung der ausgestreckten Arme in aufrechter Körperhaltung. Zwischen den Versuchsdurchläufen bzw. innerhalb einer Erholungspause wurde die physische Verfassung des Probanden mithilfe eines Körperschaubildes erfragt und die subjektive Wahrnehmung durch einen standardisierten Fragebogen erfasst.

Zur Ermittlung der Körperhaltungen und Körperbewegungen sowie zur Beurteilung der Gefährdungen durch einzelne Belastungen wurden zwei unterschiedliche, aber kombinierte Systeme herangezogen: das nicht-optische Motion-Capturing-System der Marke „Xsens“ und das um ein exoskelett-spezifisches Software-Add-On erweitertes biomechanisches Messsystem „Industrial Athlete“.

An der Laborstudie nahmen insgesamt 20 freiwillige männliche Versuchspersonen im Alter von 20 bis 35 Jahren (\bar{x} 28,2 ± 3,1 Jahre, 183,1 ± 8,3 cm Körpergröße, 82,2 ± 13,6 kg Körpermasse) teil. Lediglich zwei Probanden konnten erste Erfahrungen im Umgang mit einem Exoskelett vorweisen. Für ein möglichst homogenes Probandenkollektiv wurden ausschließlich rechtshändige Teilnehmer ausgewählt.

3. Ergebnisse

Die Verwendung des Oberkörper-Exoskeletts führt im Vergleich zur Versuchsdurchführung ohne Exoskelett zu einer Reduktion der Schultermomentbelastung. Bei einem Unterstützungsgrad von 62,5 % wurde während des Teilversuchs „Überkopfarbeit“ bei manueller Schraubtätigkeit beispielsweise eine um durchschnittlich 5,7 Nm

und im Rahmen des Schraubvorgangs mittels des Akkuschraubers eine um rund 44 % reduzierte Belastung des rechtsseitigen Schultermoments erfasst (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der rechtsseitigen Schultermomente (in Nm) über alle Versuchspersonen (n = 20) für die Teilversuche „Schrauben von Hand“, „Schrauben mit Montagehilfsmittel“ und „Statische Haltearbeit“ mit den Versuchsvariablen ohne und mit Exoskelett (oE, mE) am Beispiel der Überkopfarbeit und einem Unterstützungsgrad des Exoskeletts von 62,5 %

	Schrauben von Hand		Schrauben mit Montagehilfsmittel		Statische Haltearbeit	
	oE	mE	oE	mE	oE	mE
M	9,8	4,1	12,1	6,8	17,0	10,7
SD	± 3,0	± 2,6	± 3,3	± 2,4	± 1,9	± 2,6

Im Zuge des statischen Halteversuchs, innerhalb dessen die Drehmomentbelastung des Schultergelenks mit durchschnittlich 17 Nm am größten war, führte eine Exoskelett-Unterstützung von 62,5 % zu einer Reduktion des Schultermoments um etwa 40 % der ursprünglichen Momentbelastung auf 10,7 Nm (rechte Schulter) bzw. 10,6 Nm (linke Schulter). Für sämtliche Teilversuche zeigt sich, dass mit zunehmendem Unterstützungsgrad des Exoskeletts die tatsächliche Belastung des Schultergelenks abnimmt. Abbildung 2 kann der durchschnittliche Belastungsverlauf und die entsprechende Einordnung der Belastung in die jeweiligen softwareseitig vorgegebenen Risikostufen für eine potenzielle Muskel- und Skeletterkrankung am Beispiel der über Kopf ausgeführten Schraubtätigkeit mithilfe des Akkuschraubers entnommen werden.

Die objektiv nachgewiesene Reduzierung der Schultermomentbelastung wurde von den Probanden durch das Tragen des Exoskeletts auch subjektiv bestätigt. Hinsichtlich der händischen Schraubtätigkeit wurde die Schulterbelastung ohne die Unterstützung des Exoskeletts beispielsweise als „etwas stark“ (M = -0,8, SD = ±1,7) und während der Nutzung des Exoskeletts als „etwas schwach“ (M = 1,3, SD = ±1,9) bewertet. Die erlebte exoskelett-bedingte Minderbelastung war für die Versuchspersonen mit steigendem Unterstützungsgrad jedoch kaum bis nicht wahrnehmbar.

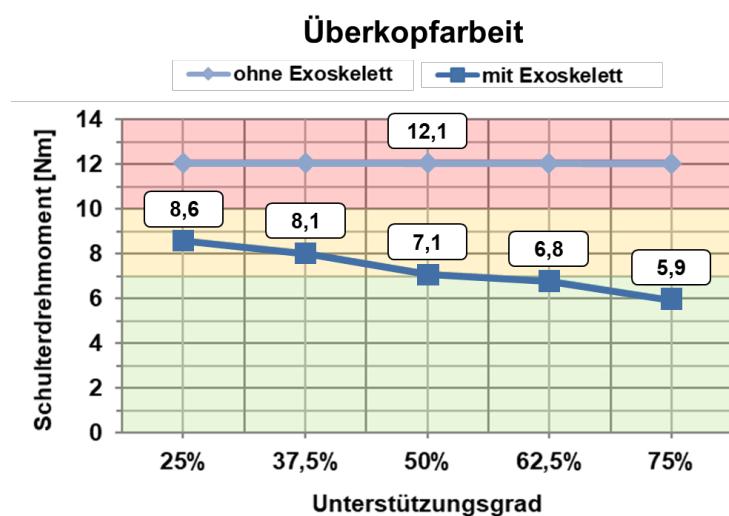


Abbildung 2: Verlauf der Drehmomentbelastung der rechten Schulter während der unterschiedlichen Unterstützungsgrade im Vergleich zur Versuchsdurchführung ohne Exoskelett unter Berücksichtigung der einzelnen Risikostufen (geringes Risiko: < 7 Nm; mittleres Risiko: 7-10 Nm; hohes Risiko: > 10 Nm)

4. Diskussion

Sowohl die Analyse der Bewegungsdaten als auch die Auswertung der subjektiven Einschätzungen der Probanden zeigen, dass der Einsatz von Oberkörper-Exoskeletten die Drehmomentbelastung auf die Schultergelenke bei Überkopfarbeiten und Arbeiten auf Schulterhöhe sowie oberhalb des Schulterniveaus reduziert. Mit der Untersuchung gingen jedoch auch Limitationen einher. Beispielsweise war in Abhängigkeit der Konstitution der Probanden, d. h. durch unterschiedliche Körpergrößen bzw. Längen der Gliedmaßen, eine Kollision einzelner Sensoren, insbesondere der Schulter- und Oberarmsensoren, mit dem Exoskelett-Gurt bzw. der -Armschale möglich. Da die Versuche mit einer inzwischen technisch überholten Version des passiven Paexo Shoulder durchgeführt wurde, ist außerdem eine erneute Durchführung mit einem aktuellen Modell durchaus sinnvoll. Auch eine Objektivierung der physiologischen Kosten durch die Erfassung der Herzschlagfrequenz und der elektromyographischen Aktivitäten der das Schultergelenk umhüllenden Muskeln, ein erweitertes Probandenkollektiv sowie eine Erhöhung der Belastungszeit mitsamt komplexeren Montagetätigkeiten können zur Validierung der gewonnenen Erkenntnisse beitragen.

Um das Grundlagenwissen über Nutzen und Risiken industrieller Exoskelette weiter auszubauen, dient die Studie als Hilfestellung für weitere derartige Untersuchungen hinsichtlich der Gefährdungsbeurteilung von Überschulterarbeit und realitätsnahen Zwangshaltungen bzw. Belastungssituationen bei unterschiedlichen Arbeitshöhen während der Anwendung eines passiven Exoskeletts. Weiterhin deuten die Ergebnisse im Hinblick auf aktuelle (DGUV-)Vorgaben zur Risikobeurteilung des Schultergelenkmoments darauf hin, dass normative Richtwerte der maximalen Gelenkbelastung zugunsten eines risikominimalen Belastungsniveaus der Nutzer reduziert bzw. angepasst werden sollten.

Die durch die Anwendung des Paexo Shoulder in dieser Studie erfassten belastungsminimierenden Effekte nehmen für die Praxis einen nicht unwesentlichen Stellenwert ein. Derzeit werden Oberkörper-Exoskelette neben einzelnen gewerblichen Einsatzszenarios, wie z. B. in der Automobilindustrie oder im Schiffsbau, auch in der medizinischen Rehabilitation und im militärischen Bereich eingesetzt (Schick 2018). Der Einsatz von Oberkörper-Exoskeletten ist ergänzend zu den beschriebenen Anwendungsbereichen, die im Wesentlichen durch Überkopfarbeiten und Tätigkeiten in Zwangshaltungen charakterisiert sind, bei der Gewährleistung sämtlicher Funktionalitäten des Exoskeletts auch in einem erweiterten Tätigkeitsfeld sinnvoll, z. B. im Handwerk. Inwieweit die beschriebenen Erkenntnisse aus ergonomischer Sicht bzw. zur Risikobeurteilung von Arbeitstätigkeiten auf und über Schulterniveau des Anwenders auch langfristig für den Praxisalltag verifizierbar sind und nachhaltig zu einer Entlastung der Nutzer sowie zur Minimierung des Verletzungsrisikos der Arbeitnehmer beitragen, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

6. Literatur

BMAS, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2021) Wissenschaftliche Begründung für die Berufskrankheit „Läsion der Rotatorenmanschette der Schulter durch eine langjährige und intensive Belastung durch Überschulterarbeit, repetitive Bewegungen im Schultergelenk, Kräfteanwendungen im Schulterbereich durch Heben von Lasten oder Hand-Arm-Schwingungen“. Gemeinsames Ministerialblatt 64–65: 1411.

- Butler T, Gillette JC (2019) Exoskeletons: Used as PPE for Injury Prevention. *Professional Safety* 3: 33–37.
- DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) Information 208-333 (2016) Belastungen für Rücken und Gelenke – was geht mich das an? Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hrsg.).
- Lück M, Hünefeld L, Brennscheidt S, Bödefeld M, Hünefeld A (2019) Grundausswertung der BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2018. 2. überarbeitete Auflage, Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.).
- 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.
- Rubio DB, Quiles EM (2021) Evaluation of exoskeleton using XSENS system including Scalefit. University of Skövde, Bachelor degree project in Product Design.
- Schick R (2018) Einsatz von Exosketten in Arbeitssystemen: Stand der Technik – Entwicklungen – Erfahrungen. Zugriff: 13. Januar, 2023. https://suqr.uni-wuppertal.de/fileadmin/site/suqr/Kolloquium/Kolloquium_Pr%C3%A4sentationen_Download/SS18/Schick_8-5-2018.pdf.

Danksagung: Ein besonderer Dank gilt den Unternehmen „Ottobock“ und „Scalefit“ für deren hilfreiche Unterstützung.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

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

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de