

**PROFESSIONELLE SICHERHEIT**

DAS TAGEBUCH DER AMERIKANISCHEN GESELLSCHAFT DER SICHERHEITSPROFIS

# PSJ



## **EXOSKELETTE** zur Prävention von Verletzungen

Identifizierung toxischer  
Führung & Widerstandsfähigkeit  
der Bauarbeiter

Innerhalb des technischen Berichts  
des aktiven Schützens

Absturzsicherung an der Vorderkante

Schutzschuhe

ASSP.ORG

MÄRZ 2019

**TECHNOLOGIE**

Von Experten Begutachtet

# EXOSKELETTE

## als PSA verwendet zur Prävention von Verletzungen

Von Terry Butler und Jason C. Gillette



## DIESER ARTIKEL KONZENTRIERT SICH AUF DIE PRÄVENTION

von Schulter-Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSD), die häufig mit Muskelermüdung und wiederholter Überbeanspruchung in einem beruflichen Umfeld verbunden sind. Der Zweck und die Motivation der Autoren sind die mögliche Berücksichtigung von Exoskeletten als PSA für die Prävention von Schulterverletzungen.

Das Oberkörper-Exoskelett ist eine tragbare Technologie, die entwickelt wurde, um die Gesundheit des Bewegungsapparates der oberen Extremitäten bei Fachleuten und Facharbeitern zu verbessern, die sich wiederholende Armbewegungen oder statische Anhebungen der Arme ausführen. Einige Exoskelette des Oberkörpers (wie das auf den Fotos auf den Seiten 32 und 34 gezeigte) sind leicht und übertragen das Gewicht der Arme von den Schultern, dem Nacken und dem oberen Rücken auf den Körperkern, wodurch die Energie gleichmäßig verteilt wird, um Stress abzubauen.

### Verletzungsprävention & Ergonomische Bewertung

OSHA bietet Ratschläge zur Bewertung, wie ein Arbeitnehmer am besten vor Verletzungen geschützt werden kann. Der erste Schritt besteht darin, die Gefahr zu beseitigen. Wenn eine Eliminierung nicht möglich ist, ist es am besten, eine geeignete technische Steuerung zu identifizieren. Wenn dies nicht funktioniert, sollte die Verwendung von Verwaltungskontrollen in Betracht gezogen werden. Eine Studie ergab beispielsweise, dass Schweißarbeiten das Risiko der Entwicklung von Supraspinatus-Tendinitis bergen und dass die Schulterschmerzen nach Entspannung und Arbeitsplatzänderung abnehmen (Herberts, Kadefors, Andersson, et al., 1981). Leider wird von den Arbeitnehmern manchmal erwartet, dass sie die mit schlecht gestalteten Jobs verbundenen Schmerzen überwinden, da die Implementierung einer Lösung zur Prävention von Verletzungen teuer ist. Wenn die Gefahr nicht beseitigt oder kontrolliert werden kann, muss PSA verwendet werden. PSA ist ein Gerät oder eine Vorrichtung, das von einer Person getragen werden soll, wenn sie einem oder mehreren Sicherheits- und Gesundheitsrisiken ausgesetzt ist.

Frühere Forschungen haben den Zusammenhang zwischen Ermüdung der Schultermuskulatur, Unbehagen und verminderter Leistung als Funktion der Armposition, insbesondere wiederholter Überkopfbewegungen, festgestellt (Chaffin, 1973). Durch laufende Forschung wurden Schwellenwerte für die Exposition gegenüber Risikofaktoren (z. B. hohe Kraft, lange Dauer, hohe Frequenz, ergonomisch ungünstige Körperhaltungen) für verschiedene Gelenke des Körpers vorgeschlagen (Rostykus & Mallon, 2017). Ein Beispiel ist das Tool zur schnellen Beurteilung der oberen Extremitäten, das auf Dosis-Wirkungs-Beziehungen für MSD-Verletzungen basiert (Bernard, 1997; Marras, Allread, Burr, et al., 2000; Marras, Fine, Ferguson, et al., 1999; Törnström, Amprazis, Christmansson, et al., 2008). Ein weiteres Beispiel ist die Rodgers-Methode zur Analyse der Muskelermüdung, auf die in diesem Artikel verwiesen wird (Rodgers, 1992). Ergonomische Bewertungen sind ein wertvolles Instrument zur Bestimmung von Arbeitsaufgaben, die Risikofaktoren beinhalten, bei denen Exoskelette als PSA nützlich sein können, um potenziell MSDs zu verhindern.

### Frühere Studien zu Muskelermüdung & Exoskeletten

Müdigkeit ist schwer objektiv zu beurteilen, da sie sowohl physische als auch mentale Komponenten umfassen kann. Eine auf Elektromyographie (EMG) basierende Studie über sich

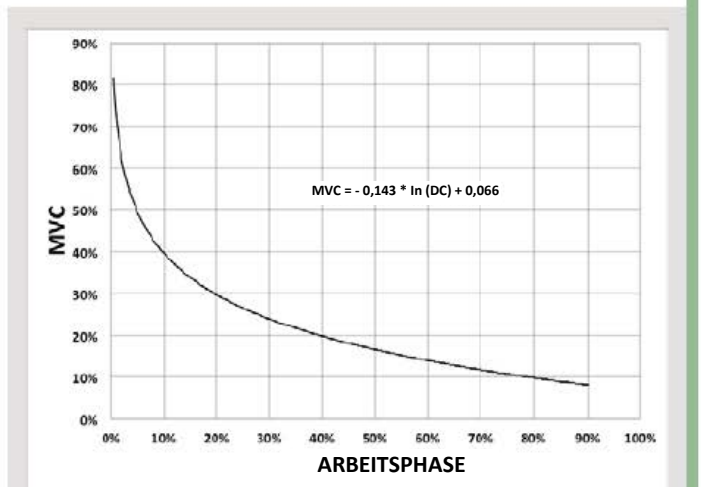
### DIE ZENTRALEN THESEN

- Dieser Artikel untersucht die mögliche Berücksichtigung von Exoskeletten als PSA zur Prävention von Schulterverletzungen.
- Es bietet eine kurze Einführung in die Prävention von Verletzungen und die ergonomische Bewertung und untersucht Studien, in denen die Ermüdung der Schultermuskulatur und die ergonomische Bewertung von Exoskeletten untersucht wurden.
- Die Autoren stellen eine Reihe von Studien vor, die durchgeführt wurden, um die mögliche Verwendung von Exoskeletten als PSA zu bewerten.
- Die vorgestellten Testmethoden liefern quantitative Daten, um Entscheidungen darüber zu unterstützen, ob Exoskelette als PSA eingestuft werden sollten.

wiederholende Hammerbewegungen ergab, dass die Griffstärke und der Bewegungsumfang des Ellbogens mit zunehmender Ermüdung abnahmen (Cote, Feldman, Mathieu, et al., 2008). Eine andere Studie verwendete Nahinfrarotspektroskopie und fand heraus, dass die Ermüdung der Schultermuskulatur vom Schulterwinkel, der Aufgabenfrequenz und dem Kraftniveau abhängt (Ferguson, Allread, Le, et al., 2013). Als Schwellenwert, der für mehr als 10% des Arbeitszyklus nicht überschritten werden sollte, wurde eine Richtlinie für eine maximale freiwillige Kontraktion (MVC) von 40% vorgeschlagen, um Müdigkeit und mögliche Verletzungen der Schulter zu vermeiden (Chaffin, Andersson & Martin, 1999). Die amerikanische Konferenz der staatlichen Industriehygieniker (ACGIH, 2016) hat ferner Schwellenwerte (TLVs) vorgeschlagen, die zeigen, dass der MVC-Wert zur Erzeugung einer lokalisierten Ermüdung der oberen Extremitäten mit zunehmendem Arbeitszyklus abnimmt (Abbildung 1).

ABBILDUNG 1

## ERMÜDUNG TLV FÜR MVC (%) VS. ARBEITSPHASE (%)

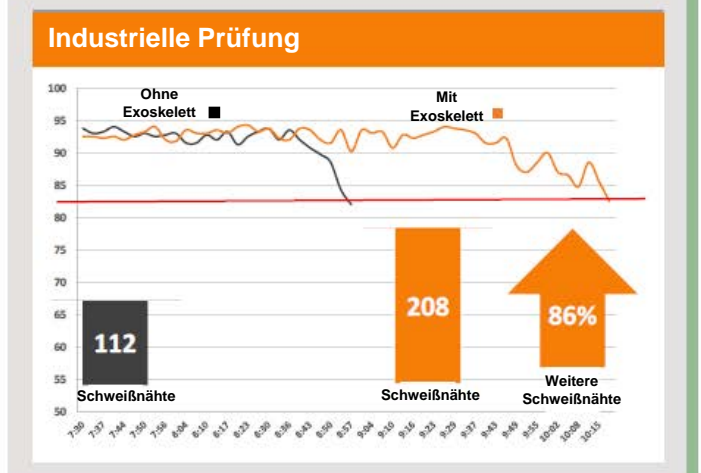


Hinweis. Lokalisierte Müdigkeit der oberen Extremität: TLV Physical Agents der 7. Auflage Dokumentation, von ACGIH, 2016, Cincinnati, OH: Autor. Copyright 2016 von ACGIH. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung.

ABBILDUNG 2

## SCHWEISS-SIMULATION MIT UND OHNE EXOSKELETT

Die orange Linie zeigt die Schweißleistung mit dem Exoskelett an, und die schwarze Linie zeigt die Leistung ohne Exoskelett an.





VANG CINEMATICS



LEVITATION-TECHNOLOGIEN

In Laborstudien wurden EMG-Sensoren verwendet, um die auf % MVC skalierte Schultermuskellaktivität zu messen. Es wurde berichtet, dass die Ausdauerzeit signifikant abnahm, wenn die EMG-Amplitude von 20% auf 40% MVC anstieg (Hagberg, 1981). Die EMG-Daten haben auch gezeigt, dass der Grad der Oberarmhebung der wichtigste Parameter ist, der die Schultermuskelbelastung beeinflusst (Sigholm, Herberts, Almström, et al., 1984). Weitere Studien haben gezeigt, dass die Unterstützung der Schulter während der Arbeit die Muskelaktivität und möglicherweise das Verletzungsrisiko verringert (Rempel, Janowitz, Alexandre, et al., 2011; Rashedi, Kim & Nussbaum, 2014). Jüngste Studien haben gezeigt, dass Exoskelette des Oberkörpers das Potenzial haben, eine nützliche, praktische Intervention zur Reduzierung von Schulterverletzungen zu sein, ohne die Belastung des unteren Rückens zu erhöhen. Sie legen jedoch nahe, dass weitere Untersuchungen erforderlich sind, um auf „unbeabsichtigte Konsequenzen“ zu testen (Esfahani, Alemi, Kim, et al., 2017; Kim, Nussbaum, Esfahani, et al., 2018a; 2018b).

### Autorenstudien zur Beurteilung von Exoskeletten

Dieser Abschnitt beschreibt eine Reihe von Studien, die die Autoren durchgeführt haben, um die mögliche Verwendung von Exoskeletten als PSA zu bewerten. Das in diesen Studien untersuchte Exoskelett ist die schwebende Flugzeugzelle, ein passives Oberkörper-Exoskelett, das das Gewicht der Arme bei Überkopfaufgaben tragen soll. Die erste Bewertung des Exoskeletts wurde von Bradley Chase, Direktor des Ergonomie-Labors an der Universität von San Diego, durchgeführt, der EMG-Daten sammelte, während 15 Teilnehmer Aufgaben erledigten, die mehrere Elemente der industriellen Arbeit mit und ohne Exoskelett erfassen. In Chases Studie beobachtete er eine statisch signifikante Verringerung der Schulter- / Nackenmuskelaktivität um 33% beim Tragen des Exoskeletts bei anspruchsvollen Arbeitsaufgaben in einer Laborumgebung. Chase erklärte, dass „die Verringerung der Schulter- / Nackenmuskelaktivität mit dem Exoskelett zu mehr Arbeitssicherheit, Komfort und Produktivität der Arbeit führen kann.“

Die zweite Studie zur Bewertung des Exoskeletts wurde in einem Produktionsunternehmen im Mittleren Westen durchgeführt und konzentrierte sich darauf, vier Probanden maximal zu ermüden. In dieser Studie wurden Schweiß- und Lackier-Simulatoren verwendet, um Leistungs- und Qualitätsdaten in Echtzeit zu erfassen (Butler, 2016). Die maximale Ermüdung wurde bei Verwendung des Exoskeletts verzögert, indem der Schweißer eine Qualitätsschweißung 73% länger aufrechterhalten und die Lebensdauer um 71 Minuten verlängern konnte (Abbildung 2, S. 33). Die über die Zeit aufgetragenen Schweißqualitätswerte bestätigen, dass die Feinmotorik der Muskeln über die Dauer des Tests aufrechterhalten wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung des Exoskeletts die Ermüdung von Schweißern, die an statischen Arbeiten beteiligt sind (stressige Körperhaltungen), und Malern, die an dynamischen Arbeiten beteiligt sind (lange Dauer und hohe Frequenz), verzögerte. Die Teilnehmer, die vor Beginn des Tests Schulterschmerzen hatten, gaben an, dass ihre Schmerzen während der Verwendung des Exoskeletts nachließen oder verschwanden. Eine dritte Studie an zwei Produktionsstätten von John Deere umfasste die EMG-Datenerfassung in der Werkstatt mit sechs Mitarbeitern aus zwei verschiedenen Werken während ihrer regulären Schicht, während sie verschiedenen Arten von physischen und ergonomischen Stressfaktoren ausgesetzt waren, die in einer Laborumgebung nicht einfach simuliert

Das in diesen Studien untersuchte Exoskelett ist die schwebende Flugzeugzelle, ein passives Oberkörper-Exoskelett, das das Gewicht der Arme bei Überkopfaufgaben tragen soll.

werden können (Gillette) & Stephenson, 2017). Bei diesem innovativen Ansatz wurden die physischen Vorteile des Tragens und Nicht-Tragens des Exoskeletts bei der Ausführung von Arbeitsaufgaben gemessen, bei denen Überkopfhaltungen erforderlich sind. Die Datenerfassung vor Ort lieferte eine reale Bewertung der potenziellen Vorteile des Exoskeletts als Form der PSA zur Verringerung von Verletzungen der Schulter durch Erkrankungen des Bewegungsapparates. Es wurden Daten von sechs erfahrenen Arbeitern gesammelt, die Montage-, Lackier-, Aufhängungs- und Schweißarbeiten ausführten. Diese Studie verwendete drahtlose EMG-Sensoren, um die Aktivität von acht Muskeln für 10-minütige Arbeitszyklen mit und ohne Exoskelett zu Beginn und am Ende der Arbeitsschicht zu überwachen.

Um die anstrengendsten Aspekte einer Arbeitsaufgabe hervorzuheben, besteht eine Möglichkeit zur Analyse der Ergebnisse darin, sich auf die höchsten 10% der EMG-Amplituden für den dominanten Arm zu konzentrieren (Abbildung 3). Wenn wir die höchsten 10% des EMG einem Arbeitszyklus von 10% gleichsetzen, beträgt der ACGIH-TLV für Schulterermüdung 40% MVC (Abbildung 1, S. 33). Während der John Deere-Studie führte das Exoskelett zu einer Reduktion des EMG des vorderen Deltamuskels ( $p = 0,08$ ) und des Bizeps-Brachii ( $p = 0,05$ ) mit dem Exoskelett. Es gab auch bescheidene Verringerungen des oberen Trapez- und Erektor-Wirbelsäulen-EMG mit dem Exoskelett. Der kleine Teil des Bereichs der Standardabweichung des vorderen Deltamuskels überschritt geringfügig die MVC-Schwelle von 40% mit dem Exoskelett. Fast der gesamte Standardabweichungsbereich überschritt jedoch die 40% MVC-Schwelle ohne Exoskelett. Der Standardabweichungsbereich der Erektorspinae fiel mit dem Exoskelett unter die MVC-Schwelle von 40%, überschritt diese Schwelle jedoch ohne das Exoskelett.

Bei Toyota in Kanada wurde eine vierte Studie abgeschlossen, in der das Exoskelett während der Montage des Fahrwerks untersucht wurde (Gillette & Stephenson, 2018). Die Fahrwerksbaugruppe hat schnelle Zykluszeiten und ist typisch für Überkopparbeiten, bei denen es zwei grundlegende Optionen zur Reduzierung des ergonomischen Risikos gibt. Eine davon besteht darin, das Auto zur Montage auf die Seite zu drehen, was ergonomische und finanzielle Herausforderungen mit sich bringt. Die andere unterstützt die Arme beim Arbeiten, um Muskelaktivierung und Müdigkeit zu reduzieren. Elf Mitarbeiter meldeten sich freiwillig für diese Studie, und es wurden Daten für 10

Überkopf- Montageaufgaben für Kraftfahrzeuge gesammelt. Es wurden ungefähr 12 Minuten Daten von 11 Mitarbeitern gesammelt, die 10 Arbeitsaufgaben ausführten, wobei neun Aufgaben 10 Wiederholungen und eine Arbeitsaufgabe drei Wiederholungen an mehreren Stationen aufwies. Ähnlich wie in der John Deere-Studie wurden drahtlose EMG-Sensoren verwendet, um die Aktivität von acht Muskeln mit und ohne Verwendung des Exoskeletts zu überwachen.

Um die Wiederholung einer Arbeitsaufgabe stärker in den Vordergrund zu rücken, können Sie die Ergebnisse auch analysieren, indem Sie sich auf die höchsten 50% der EMG-Amplituden für den dominanten Arm konzentrieren (Abbildung 4). Wenn wir die höchsten 50% des EMG einem Arbeitszyklus von 50% gleichsetzen, beträgt der ACGIH-TLV für Schulterermüdung 16,5% MVC (Abbildung 1, S. 33). Während der Studie von Toyota Kanada führte das Exoskelett zu einer Reduktion des EMG des vorderen Deltamuskels ( $p = 0,001$ ), des Bizeps brachii ( $p = 0,001$ ) und des Erektorspinae ( $p = 0,03$ ) mit dem Exoskelett. Es gab eine bescheidene Zunahme des oberen Trapez-EMG mit dem Exoskelett. Das durchschnittliche EMG des vorderen Deltamuskels und des Erektors der Wirbelsäule fiel mit dem Exoskelett unter die MVC-Schwelle von 16,5%, überschritt diese Schwelle jedoch ohne das Exoskelett. Das durchschnittliche obere Trapez-EMG überschritt die MVC-Schwelle von 16,5% sowohl mit als auch ohne Exoskelett. Dies ist also ein Bereich, in dem zusätzliche Eingriffe wie die Unterstützung des Nackens von Vorteil sein können.

Die Rodgers-Muskelermüdungsanalyse und eine unternehmensspezifische ergonomische Risikoanalyse wurden für die 10 Aufgaben durchgeführt, die mit EMG bei Toyota Kanada bewertet wurden. In einigen Fällen stimmt das Risiko für jedes Körperteil in beiden Analysen überein (Abbildung 5, S. 36); in anderen gab es Meinungsverschiedenheiten. Auf die Frage nach der Konsistenz der ergonomischen Risikobewertungsergebnisse antwortete ein Raum voller Ergonomie-Fachleute, dass eine gewisse Variabilität der Ergebnisse nicht ungewöhnlich sei. Wenn bei einer Arbeitsaufgabe ein hoher ergonomischer Risikowert festgestellt wird, kann mithilfe der EMG festgestellt werden, ob die Verwendung eines Exoskeletts von Vorteil ist. Für diese Arbeitsaufgabe zeigten die ergonomischen Bewertungen, dass der Hals und die rechte Schulter ein hohes Risiko aufwiesen. Die EMG-Ergebnisse zeigen, dass die Muskelaktivität des vorderen Deltamuskels und des oberen Trapezius mit dem Exoskelett (obwohl immer noch leicht über dem TLV für den oberen Trapezius) verringert war, was mit den betroffenen Körperteilen übereinstimmt (Abbildung 5, S. 36).

ABBILDUNG 3

### JOHN DEERE: MAXIMAL 10% EMG

Die John Deere EMG-Amplitudenergebnisse. Die durchschnittlichen EMG-Amplituden plus Standardabweichungen werden angezeigt. Die blaue Linie zeigt den 40% MVC ACGIH TLV für Schulterermüdung.

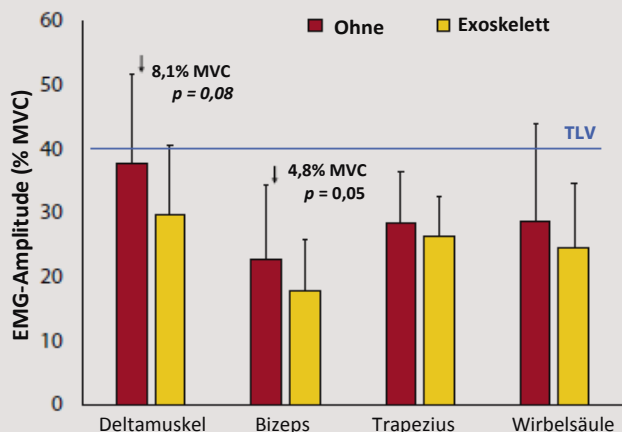
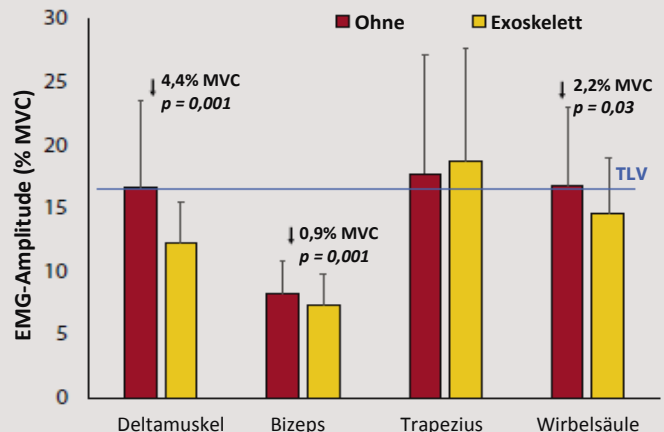


ABBILDUNG 4

### TOYOTA: MAXIMAL 50% EMG

Die Toyota EMG Amplitudenergebnisse. Es werden durchschnittlich die EMG-Amplituden von 10 Mitarbeitern plus Standardabweichungen angezeigt. Die blaue Linie zeigt den 16,5% MVC ACGIH TLV für Schulterermüdung.



## DIE RODGERS MUSKEL-ERMÜDUNGSANALYSE & DIE ERGONOMISCHE ANALYSE DES UNTERNEHMENS

Die Abbildung 5a zeigt Beispiele für die Rodgers-Muskelermüdungsanalyse und die ergonomische Analyse des Unternehmens für Jobaufgabe Nr. 3. In der Abbildung 5b werden durchschnittliche EMG-Amplituden für Bodenrohre angezeigt, um die Risikoanalyse zu validieren. Die blaue Linie zeigt den 16,5% MVC ACGIH TLV für Schulterermüdung.

ABBILDUNG 5A

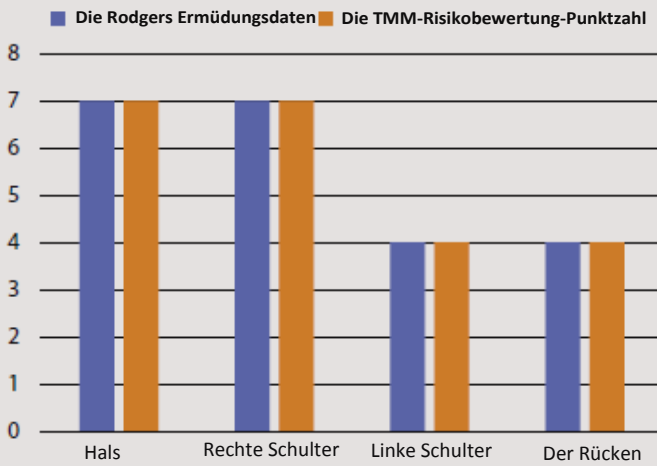
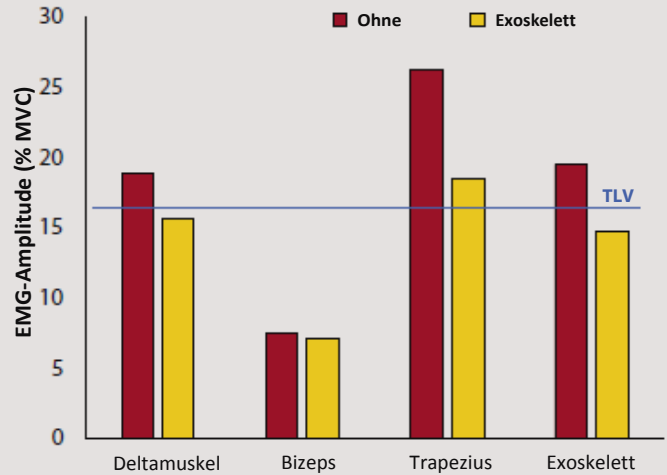


ABBILDUNG 5B



### Diskussion

Der Schwerpunkt dieses Artikels liegt auf der möglichen Verwendung von PSA wie einem passiven Aktivierungsoberkörper-Exoskelett, um MSD-Verletzungen der Schulter vorzubeugen. Die Autoren haben laborbasierte, simulatorische und Vor-Ort-Datenerfassungen als mögliche Methoden beschrieben, um Beweise dafür zu sammeln, ob ein Exoskelett als PSA dient. Die laborbasierte Studien profitieren von der Möglichkeit, Haltungsbedingungen und zusätzliche Messfunktionen systematisch zu manipulieren. Es ist jedoch schwierig, industrielle Arbeitsbedingungen zu simulieren, und die Teilnehmer sind möglicherweise nicht mit den interessierenden Aufgaben vertraut. Simulatoren profitieren von präzisen Leistungsmessungen, sind jedoch auf die spezifische Anwendung beschränkt, für die der Simulator entwickelt wurde. Die Vor-Ort-Studien profitieren von realen Aufgabenbedingungen und erfahrenen Teilnehmern, sind jedoch möglicherweise in der Messinstrumentierung eingeschränkt und erfordern eine Koordination, um Arbeitsstörungen zu minimieren.

Diese Reihe von Studien zeigt, dass Arbeitnehmer mit Jobs, bei denen Lasten über Schulterhöhe getragen oder übertragen werden (z. B. Montage, Lackieren, Schweißen, Teilehandhabung), von der Verwendung des in den Studien als PSA bewerteten Exoskelettgeräts profitieren können. Eine Verringerung des EMG bei Verwendung des Exoskeletts dürfte den Beginn der Muskelermüdung verzögern und das Risiko chronischer Schulterverletzungen verringern. Aus den getesteten Arbeiten kann das Exoskelett eine ergonomische Lösung als PSA für Aufgaben mit einer Schulterflexion von 30° bis 170° sein, die durch Modifikation der Baustelle nicht beseitigt werden können. Die EMG-Ergebnisse zeigen, dass die Muskeln immer noch arbeiten, aber nicht so hart sind, was die Bedenken hinsichtlich der Entwicklung einer Muskelatrophie verringert (Butler & Wisner, 2017). Die Analyse von maximal 10% EMG ist möglicherweise besser für Jobs mit höherer Kraft und geringerer Wiederholung geeignet, während maximal 50% EMG für Jobs mit niedrigerer Kraft und höherer Wiederholung besser geeignet sind.

In den Studien der Autoren wurde ein Design des passiven Exoskeletts des Oberkörpers bewertet, andere Exoskelette können jedoch eine andere Leistung erbringen. Daher ist nicht bekannt, ob sie die Definition der PSA erfüllen. PSA ist persönlich. Die Atemschutzmasken, Handschuhe oder Schutzbrillen müssen anhand verschiedener Leistungsstandards getestet werden, um nachzuweisen, ob das Schutzniveau den Anforderungen entspricht, die als PSA bezeichnet werden sollen. Wie aus den

angegebenen Forschungsergebnissen hervorgeht, kann argumentiert werden, dass dieselbe Logik für verschiedene Hersteller von Exoskeletten gilt. Um beispielsweise das Gewicht des Exoskeletts zu verdoppeln, muss der Benutzer mehr Energie aufwenden, um das Gerät herumzutragen und zu aktivieren, um bei Bedarf Unterstützung zu erhalten. Die Verwendung eines passiven Exoskeletts muss mit der Anthropometrie des Benutzers sowie mit Arbeitsaufgaben, verwendeten Werkzeugen und gehandhabten Teilen in Einklang gebracht werden. Dies erfordert die Kenntnis der Sorgfalt, Einschränkungen und des Einsatzes der Technologie, damit die Mitarbeiter ordnungsgemäß geschult werden können.

Wie bereits erwähnt, ist PSA persönlich und daher wie alle anderen Formen von PSA für die Verwendung von entscheidender Bedeutung. Wie andere Formen von PSA sollten Exoskelette Leistungsstandards erfüllen müssen, um sicherzustellen, dass die Mitarbeiter angemessen geschützt sind und keinen unerwünschten Risiken ausgesetzt sind. Leider existieren solche Standards nicht. Die Grundlage dieser Forschung ist die Präsentation von Testmethoden, um quantitative Daten zu erhalten, die Entscheidungen darüber unterstützen, ob Exoskelette als PSA eingestuft werden sollten.

Wenn Pflege, Einschränkungen und Verwendung von PSA klar definiert sind, kann der Mitarbeiter entsprechend geschult werden, um Missbrauch oder die Einführung unerwünschter Risiken in das Arbeitsumfeld zu verhindern. Um diese Risiken zu verstehen, muss eine sorgfältige Bewertung der Merkmale und Vorteile jedes Exoskeletts in Betracht gezogen werden. Das Design, das Gewicht und der Verwendungszweck des Exoskeletts müssen für den Benutzer und die Arbeit gelten. Wenn Sie nach den Daten fragen, die zur Unterstützung der vom Hersteller gemachten Marketingansprüche verwendet werden, können Sie den Missbrauch oder mögliche negative Auswirkungen auf den Benutzer minimieren.

Zum Beispiel ist es wichtig zu überlegen, wie der Benutzer im Notfall aus dem Exoskelett befreit werden kann. Der einzige Auslösepunkt oder abbrechbare Schnallen für den Fall, dass der Benutzer an einer sich bewegenden Linie hängen bleibt, sind wichtige Überlegungen. Das Profil und wie weit das Exoskelett vom Körper entfernt ist, kann auch dazu beitragen, dass das Gerät an einem Teil oder einer sich bewegenden Linie hängen bleibt. Wie bei jeder PSA ist es wichtig, dass das Material und die Bestandteile des Exoskeletts, die mit dem Körper in Kontakt kommen, aus atmungsaktivem und kühlem Material bestehen, um Komfort und

Akzeptanz zu gewährleisten. Ist das Gerät schwer entflammbar, wenn es Funken oder Flammen ausgesetzt ist? Baut das Gerät in stark zerstäubter Luft wie in einer elektrostatischen Spritzkabine eine statische Ladung auf? Ist Antimutilation (Schutzhüllen) für den Einsatz in hochwertigen Umgebungen verfügbar, wenn um lackierte Teile herum gearbeitet wird, um Kratzer zu vermeiden? Wie ist die Aktivierung beim Anheben der Arme? Ist es glatt oder ruckartig? Die reibungslose Aktivierung der Armstütze ist erforderlich, um feine Bewegungen zu kontrollieren und unerwünschte Bewegungen zu verhindern. Was ist das Gewicht des Exoskeletts und kann es den Benutzer negativ beeinflussen, indem es die Herzfrequenz der Person erhöht oder die Kräfte auf die Gelenke erhöht, wie dies bei einigen Atemschutzmasken oder umluftunabhängigen Atemgeräten der Fall ist?

Dies alles waren Überlegungen bei der Auswahl des Exoskeletts, das in den Studien in einer Produktionsstätte im Mittleren Westen für John Deere und Toyota verwendet wurde. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Forschung sind auf Exoskelette mit passiver Aktivierung des Oberkörpers mit einem Gewicht von weniger als 6,5 lb anwendbar. Exoskelette mit einem Gewicht von mehr als 6,5 Pfund und Design-Merkmalen, die sich von der getesteten Einheit unterscheiden, können zu unterschiedlichen Leistungsergebnissen führen. Sie können unterschiedliche Einschränkungen aufweisen und als solche ist ihre Einstufung als PSA möglicherweise nicht anwendbar.

Die Studien der Autoren lieferten quantitative Belege für die Vorteile des Exoskeletts unter kurzfristigen, realen Arbeitsbedingungen, aber auch längerfristige Studien sind erforderlich. Exoskelette sollten Leistungstests bestehen müssen, um die Sicherheit zu gewährleisten. Das ASTM-Komitee F48 für Exoskelette und Exo-Anzüge hat begonnen, solche Standards zu entwickeln. PSJ

## Referenzen

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). (2016). *Upper limb localized fatigue: TLV physical agents 7th edition documentation*. Cincinnati, OH: Author.

Bernard, B.P. (Ed.). (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity and low back* (NIOSH Publication No. 97-141). Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services.

Butler, T. (2016, Sept.). Exoskeleton technology: Making workers safer and more productive. *Professional Safety*, 61(9), 32-36.

Butler, T. & Wisner, D. (2017). Exoskeleton technology: Making workers safer and more productive, part 2 (Session 579). *Proceedings of Safety 2017: ASSE's Professional Development Conference, Denver, CO*.

Chaffin, D.B. (1973). Localized muscle fatigue: Definition and measurement. *Journal of Occupational Medicine*, 15(4), 346-354.

Chaffin, D.B., Andersson, G.B.J. & Martin, B.J. (1999). *Occupational biomechanics*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Cote J.N., Feldman, A.G., Mathieu, P.A., et al. (2008). Effects of fatigue on intermuscular coordination during repetitive hammering. *Motor Control*, 12(2), 79-92.

Esfahani, M.I.M., Alemi, M.M., Kim, S., et al. (2017). Effects of an occupational wearable assistive device on low back loads. *Proceedings of the American Society of Biomechanics Annual Meeting, Boulder, CO*.

Ferguson, S.A., Allread, W.G., Le, P., et al. (2013). Shoulder muscle fatigue during repetitive tasks as measured by electromyography and near-infrared spectroscopy. *Human Factors*, 55(6), 1077-1087.

Gillette, J.C. & Stephenson, M.L. (2017). EMG assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. *Proceedings of the American Society of Biomechanics Annual Meeting, Boulder, CO*.

Gillette, J.C. & Stephenson, M.L. (2018). EMG analysis of an upper body exoskeleton during automotive assembly. *Proceedings of the American Society of Biomechanics Annual Meeting, Rochester, MN*.

Hagberg, M. (1981). Work load and fatigue in repetitive arm elevations. *Ergonomics*, 24(7), 543-555.

Herberts, P., Kadefors, R., Andersson, G., et al. (1981). Shoulder pain in industry: An epidemiological study on welders. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 52(3), 299-306.

Kim, S., Nussbaum, M.A., Esfahani, M.I.M., et al. (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. doi:10.1016/j.apergo.2018.02.025

Kim, S., Nussbaum, M.A., Esfahani, M.I.M., et al. (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. doi:10.1016/j.apergo.2018.02.024

Marras, W., Allread, W., Burr, D., et al. (2000). Prospective validation of a low-back disorder risk model and assessment of ergonomic interventions associated with manual materials handling tasks. *Ergonomics*, 43(11), 1866-1886.

Marras, W., Fine, L., Ferguson, S., et al. (1999). The effectiveness of commonly used lifting assessment methods to identify industrial jobs associated with elevated risk of low-back disorders. *Ergonomics*, 42(1), 229-245.

Rashedi, E., Kim, S. & Nussbaum, M.A. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 57(12), 1864-1874.

Rempel, P., Janowitz, I., Alexandre, M., et al. (2011). The effect of two alternative arm supports on shoulder and upper back muscle loading during pipetting. *Work*, 39(2), 195-200.

Rodgers, S.H. (1992). A functional job evaluation technique. *Occupational Medicine: State of the Art Reviews*, 7(4), 679-711.

Rostykyus, W. & Mallon, J. (2017, Sept.). Leading measures preventing MSDs and driving ergonomic improvements. *Professional Safety*, 62(9), 37-42.

Sigholm, G., Herberts, P., Almström, C., et al. (1984). Electromyographic analysis of shoulder muscle load. *Journal of Orthopaedic Research*, 1, 379-386.

Törnström, L., Amprazis, J., Christmansson, M., et al. (2008). A corporate workplace model for ergonomic assessments and improvements. *Applied Ergonomics*, 39(2), 219-228.

---

**Terry Butler, CSP**, ist Präsident von Lean Steps Consulting. Seine 38-jährige Karriere konzentrierte sich auf die globale Fertigung. In den letzten 20 Jahren war er Vizepräsident für Einrichtungen und Direktor für EH&S bei Vermeer Konzern. In den letzten 4 Jahren hat Butler mit der Iowa State University und globalen Herstellern zusammengearbeitet, um die physischen Vorteile der Arbeit mit und ohne Exoskelett-Technologie zu quantifizieren, die allen Bereichen der Fertigung und professionellen Dienstleistungen zugute kommen. Butler hat einen B.S. in Arbeitssicherheitstechnik und Industrietechnik an der Illinois State University. Er ist ein professionelles Mitglied des Hawkeye Kapitels von ASSP.

**Jason C. Gillette** ist außerordentlicher Professor und Direktor von Abschluss der Ausbildung an der Fakultät der Kinesiologie an der Iowa Staatlichen Universität. Seine Forschungsinteressen umfassen Biomechanik, Ergonomie und Verletzungsmechanismen. Er verwendet Video-, Kraft- und EMG-Messungen zur Analyse der menschlichen Bewegung sowie zur Modellierung des Bewegungsapparates, um die interne Belastung der Strukturen des menschlichen Körpers abzuschätzen. Gillette hat einen B.S. in Engineering Science, einen M.E. in Engineering Mechanik und einen Ph.D. in Biomedizintechnik / Technische Mechanik an der Iowa Staatlichen Universität.

---

## Danksagung

Die Autoren danken dem Management und den Mitarbeitern von John Deere Iowa und Toyota Manufacturing Cambridge Canada um dem Feldtestteam Zugang zu seinen Einrichtungen, seinem Fachwissen und seiner Ausrüstung zu gewähren. Die Autoren danken auch denjenigen, die an diesen Studien teilgenommen haben, sowie Bradley Chase, Universität von San Diego, für ihren Beitrag zur Förderung der Forschung und des Verständnisses dieser neuen Technologie und ihrer Anwendung als PSA im Arbeitsumfeld.

## Weitere Informationen

Um mehr über das in diesem Artikel getestete Exoskelettgerät zu erfahren, wenden Sie sich an Joseph Zawaideh von Levitate unter [josephz@levitatetech.com](mailto:josephz@levitatetech.com).