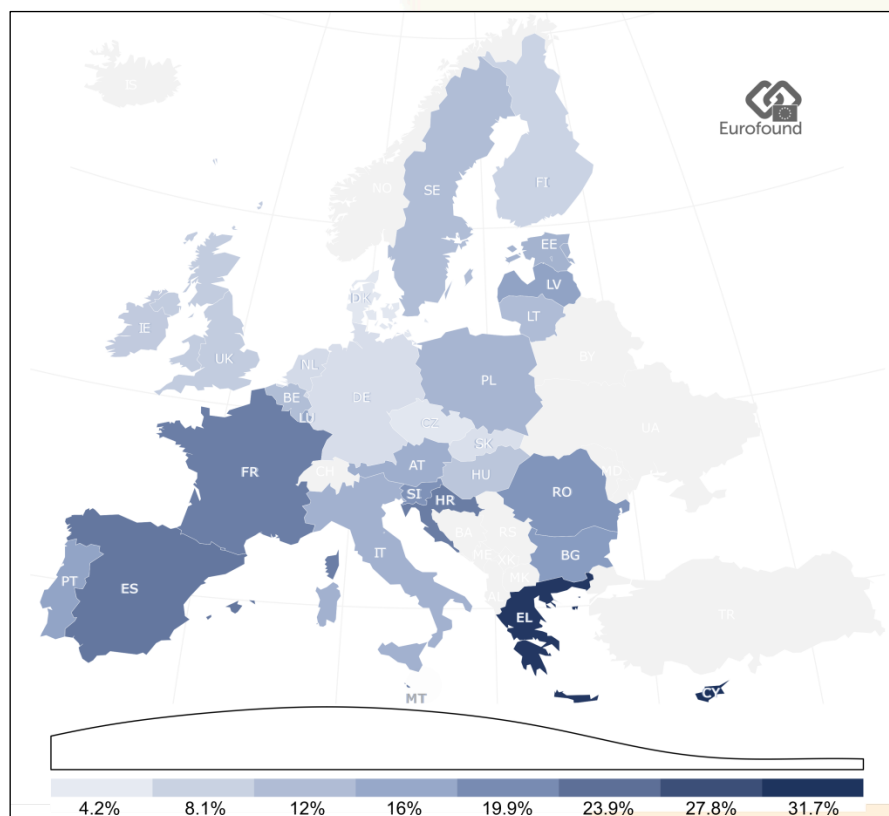


## DER EINFLUSS VON EXOSKELETEN AUF DIE SICHERHEIT UND GESUNDHEIT BEI DER ARBEIT

### Einleitung

In den letzten Jahren wurden neue am Körper getragene Assistenzsysteme – so genannte Exoskelette – für Arbeitsplätze entwickelt. Ihre Etablierung an gewerblichen Arbeitsplätzen ist nicht unwahrscheinlich, da sich Prototypen in Bereichen wie der medizinischen Versorgung bereits bewährt haben. Gegenwärtig scheinen Exoskelette neue Möglichkeiten zu eröffnen, arbeitsbedingten Muskel- und Skeletterkrankungen (MSE) entgegenzuwirken. MSE stellen eines der größten Probleme für Arbeitsplätze in Europa dar<sup>1</sup>. Abbildung 1 zeigt die prozentualen Anteile von Beschäftigten, die während ihrer Arbeit in anstrengenden und schmerzhaften Körperhaltungen arbeiten. Dies kann mit einer schlechten Arbeitsplatzgestaltung in Zusammenhang stehen, die Zwangshaltungen begünstigt. Exoskelette bieten vor diesem Hintergrund große Potentiale Beschäftigte während ihrer Arbeit zu unterstützen.

Abbildung 1 Die prozentualen Anteile aller Beschäftigten in Europa, die in anstrengenden oder schmerzhaften Körperhaltungen arbeiten (modifiziert Eurofound 2019)



<sup>1</sup> Über 40 % der Beschäftigten in Europa leiden an Schmerzen oder Beschwerden im unteren Rücken oder im Schulterbereich. Darüber hinaus führen 63 % der Beschäftigten repetitive Aufgaben aus oder arbeiten häufig (46 %) in Zwangshaltungen Körperhaltungen (Eurofound, 2012). Die jährlichen Kosten, die durch gesundheitliche Probleme aufgrund dieser Arbeitsbedingungen entstehen, entsprechen ca. 2 % des Bruttoinlandsprodukts der Europäischen Union (EU) (Bevan, 2015). Viele dieser Probleme werden durch Tätigkeiten im Bereich der manuellen Lasthandhabung (mLH) verursacht; dazu gehören das Heben, Absetzen, Halten oder Tragen von Lasten (Zurada, 2012; Collins and O'Sullivan, 2015). Arbeiten, bei denen der Körper gedreht oder gebeugt werden muss sowie Arbeiten über Kopf erhöhen ebenfalls das Risiko einer MSE. Neben den gesundheitlichen Auswirkungen, hat die Problematik demnach auch eine wirtschaftliche Bedeutung.

Exoskelette sind am Körper getragene Roboterstrukturen, die den Bewegungsapparat unterstützen, indem verschiedene mechanische Prinzipien genutzt werden. Im Hinblick auf arbeitsbedingte MSE können sie somit die muskuläre Belastung in häufig betroffenen Körperregionen wie dem unteren Rücken oder den Schultern reduzieren. Obwohl der Nutzen von Exoskeletten zur Vorbeugung von MSE erheblich sein könnte, gilt es auch zu berücksichtigen, dass neue Fragen bezüglich der Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit beantwortet werden müssen. In dieser Hinsicht hat das französische nationale Forschungs- und Sicherheitsinstitut für die Verhütung von Berufsunfällen und Berufskrankheiten (INRS) eine Übersicht über die neuen Risikofaktoren am Arbeitsplatz bei der Verwendung von Exoskeletten veröffentlicht (INRS, 2019). Einerseits können Exoskelette als eine Möglichkeit betrachtet werden, die arbeitsbedingte Belastung zu reduzieren, oder Beschäftigte mit körperlichen Beeinträchtigungen zu unterstützen. Andererseits könnten, aufgrund der mechanischen Wirkung der Exoskelette, andere Körperregionen vermehrt belastet werden, wodurch sich wiederum neue potenzielle Gesundheitsrisiken ergeben. Außerdem werden die motorische Kontrolle und die Gelenkstabilität beeinflusst sowie die Kinematik verändert (INRS, 2018). Darüber hinaus besteht das Risiko, dass die ergonomische Gestaltung von Arbeitsplätzen vernachlässigt wird und zunehmend Exoskelette zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen eingesetzt werden. Dennoch gibt es viele mobile Arbeitsplätze, wie z. B. in Speditionsbetrieben oder Notfalldiensten, bei denen sich aufgrund verändernder Umgebungsanforderungen nur eingeschränkt Maßnahmen zur ergonomischen Gestaltung umsetzen lassen (Schick, 2018). Besonders in diesen Berufen ist, durch häufiges Heben, falsche Körperhaltung oder schwere persönliche Schutzausrüstung (PSA), das Risiko einer körperlichen Überbeanspruchung erhöht. Vor diesem Hintergrund könnten Exoskelette eine Reihe von Möglichkeiten zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen bieten.



Inc/MONOPOLY919, ©Shutterstock

Bedenken liegt gegenwärtig darin, dass bei der Verwendung von Exoskeletten, die Technologie unmittelbar am Körper getragen wird. Bei der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen wird daher von dieser Maßnahme zunächst abgesehen, da technische und organisatorische Gestaltungsprinzipien vorrangig zu berücksichtigen sind. Grundsätzlich sollte die Verwendung von Exoskeletten zur Verbesserung der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen stets das letzte Mittel sein. Aktuell gibt es nur wenig arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zum Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Eine Herausforderung besteht darin, die Langzeitfolgen von Exoskeletten auf die menschliche Biomechanik und Physiologie zu ermitteln, was sich in der Praxis nur schwer umsetzen lässt (Liedtke und Glitsch, 2018), da die Art des Exoskeletts, die Arbeitsaufgaben und die Anwendungszeiträume berücksichtigt werden müssen. Die Ermittlung der gesundheitlichen Auswirkungen im Zusammenhang mit physiologischen und biomechanischen Aspekten ist, aufgrund der Komplexität des Themas, zeitaufwändig und hat gerade erst begonnen. Jedoch müssen neue Ansätze zum Nachweis der Wirksamkeit von Exoskeletten entwickelt werden, um die Vorteile und Nachteile dieser Technologie besser abschätzen zu können. Dieser Artikel gibt eine Übersicht der aktuell geführten Diskussion über die Verwendung und Bewertung von Exoskeletten im Hinblick auf die Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit.

# Exoskelette

## Begriffsbestimmung

Ein Exoskelett kann als ein persönliches Assistenzsystem definiert werden, das den Körper auf mechanische Weise beeinflusst (Liedtke und Glitsch, 2018). Im engeren Sinne sind Exoskelette tragbare Robotertechnologien, die auf den Körper wirkende innere oder äußere Kräfte verändern und somit die Kraft des Benutzers verbessern oder unterstützen. Aufgrund der zahlreichen Anwendungsgebiete und der verschiedenen Funktionalitäten, gibt es nach wie vor keine einheitliche Definition. In der Literatur herrscht der allgemeine Konsens, dass Exoskelette als am Körper getragene externe mechanische Strukturen definiert werden können (Herr, 2009; De Looze et al., 2016), dabei sind aktive oder passive Systeme voneinander zu unterscheiden.

Bei aktiven Exoskeletten werden Aktuatoren (mechanische Antriebskomponenten) verwendet, um die menschlichen Bewegungen zu unterstützen. Diese mechanischen Komponenten bestehen aus elektrischen Motoren, können aber auch durch eine Hydraulik oder Pneumatik angetrieben werden (Gopura und Kiguchi, 2009). Mit dieser Unterstützung verstärken Exoskelette die Kraft und verbessern so die Leistung eines Benutzers. Passive Exoskelette hingegen nutzen die Rückstellkräfte von Federn, Dämpfern oder anderen Materialien, um die menschliche Bewegung zu unterstützen. Die in einem passiven Exoskelett gespeicherte Energie wird ausschließlich durch die Bewegungen des Benutzers erzeugt (De Looze et al., 2016). Außerdem werden Kräfte umverteilt, um bestimmte Körperregionen zu schützen. Die Leistung des Benutzers wird nicht durch zusätzliche körperliche Kraft, sondern durch die Fähigkeit verändert, anstrengende Körperhaltungen über einen längeren Zeitraum hinweg einzunehmen, z. B. bei Überkopfarbeit.

Hybrid-Exoskelette, die aktive oder passive Systeme sein können, sind bisher eine Ausnahme. Sie nutzen Gehirnwellenaktivität (EEG-Signale) oder Muskelaktivierung, um Bewegungen einzuleiten. Aktuell ist ihr Einsatz in der Industrie nicht absehbar, weshalb sie in diesem Artikel nicht weiter erörtert werden.

## Arten von Exoskeletten

Exoskelette können in drei Gruppen klassifiziert werden: Unterkörper-, Oberkörper- und Ganzkörper-Exoskelette. Darüber hinaus gibt es Exoskelette für einzelne Gelenke (Gams et al., 2013), die jedoch, aufgrund ihrer höchst individuellen Aspekte und ihres Verwendungszwecks für Einzelfälle, in diesem Artikel nicht weiter beschrieben werden. Exoskelette für den Oberkörper verwenden in der Regel feste mechanische Strukturen, um die auf die oberen Gliedmaßen und den Torso (z. B. Oberarme, Unterarme, Schultern oder unterer Rücken) wirkenden Körperkräfte umzuverteilen. In diesem Fall bedeutet die Umverteilung der Kräfte, dass andere Körperregionen, wie z. B. die Hüften oder Beine, zusätzliche Lasten aufnehmen müssen. Unterkörper-Exoskelette können Kräfte in den Boden ableiten und reduzieren somit die Belastung des Bewegungsapparats. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass diese Prinzipien stark von Gestaltung und Funktionalität des Exoskeletts abhängig sind. Assistenzsystem, mit denen sich Oberkörper und Unterkörper gleichzeitig unterstützen lassen, können als Ganzkörper-Exoskelette definiert werden.

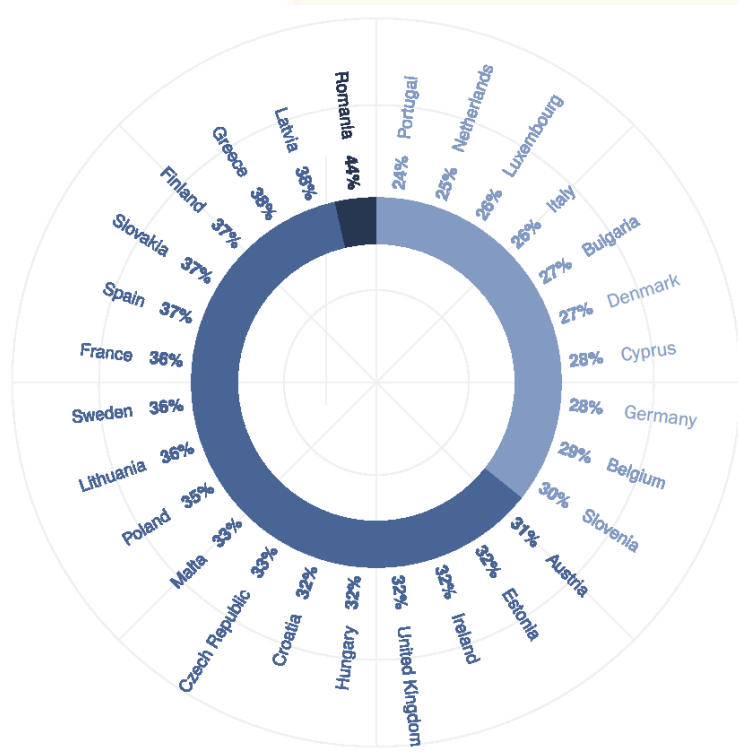
## Anwendungsgebiete an Arbeitsplätzen

Die Idee, menschliche Bewegungen mit technischen Hilfsmitteln zu unterstützen, ist nicht neu. Tragbare Unterstützungssysteme wie Exoskelette werden in der medizinischen Betreuung seit einiger Zeit verwendet, z. B. der Einsatz von Orthesen zu Rehabilitationszwecken, um verletzte Patienten bei der Wiederherstellung ihrer körperlichen Gesundheit zu unterstützen (Viteckova et al., 2013). Trotzdem sind Orthesen von Exoskeletten zu unterscheiden, da sie der Unterstützung von Menschen mit Muskel- und Skeletterkrankungen dienen und demnach der rehabilitative und nicht präventive Ansatz im Vordergrund steht. Exoskelette wurden außerdem für militärische Anwendungen entwickelt (De Looze et al., 2016). Die Verwendung von Exoskeletten zum Erhalt oder Schutz der körperlichen Gesundheit von Beschäftigten ist jedoch neu. Obwohl die Verbesserung der Arbeitsbedingungen mit Exoskeletten aktuell strittig ist, bieten sie dennoch neue Möglichkeiten für die Sicherheit und Gesundheit von Beschäftigten (Schick, 2018). Die Anforderungen an ergonomische Arbeitsplätze werden diesbezüglich in Zukunft eine wichtige Rolle spielen, um die körperliche Gesundheit einer durch den demografischen

Wandel bedingten alternden Erwerbsbevölkerung, sicherzustellen. Aus dieser Sicht ist es unabdingbar, neue ergonomische Werkzeuge zu entwickeln, da die Optionen derzeit begrenzt sind (Hensel et al., 2018; Schick, 2018).

Die Anwendungsgebiete für Exoskelette zur Reduzierung von arbeitsbedingten MSE sind zahlreich. In ganz Europa werden 30 % der Arbeitsaufgaben der manuelle Lasthandhabung (mHL) zugeordnet (Eurofound, 2012), was ein erhebliches Gesundheitsrisiko darstellt. Abbildung 2 gibt einen Überblick der Beschäftigten in Europa, die ein Viertel ihrer Arbeitszeit schwere körperliche Arbeit verrichten. Insbesondere in Rumänien trifft dies fast auf die Hälfte der Beschäftigten (44 %) zu. Demnach sind ergonomische Arbeitsbedingungen in Europa nicht selbstverständlich. Es ist jedoch wichtig zu berücksichtigen, dass die ergonomische Gestaltung an stationären Arbeitsplätzen meist mit technischen oder organisatorischen Maßnahmen sichergestellt werden kann. Solange diese Maßnahmen umgesetzt werden können, ist der Einsatz von Exoskeletten nicht zu empfehlen (Schick, 2018). Gegenwärtig scheint jedoch die Leistungssteigerung durch Exoskelette von größerem Interesse zu sein als die menschengerechte Gestaltung von Arbeitsplätzen (Baltrusch et al., 2018).

**Abbildung 2** Prozentualer Anteil der Beschäftigten aller Altersgruppen in Europa, die ein Viertel ihrer Arbeitszeit mit dem Tragen oder Bewegen schwerer Lasten verbringen (Eurofound, 2019)



Aufgrund technischer Probleme haben aktive Exoskelette zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur wenig praktische Relevanz. In mehreren Berichten wird auf Probleme bezüglich Gewicht, mechanischer Struktur, Akkulaufzeit und Konstruktion der Antriebsmechanik aktiver Exoskelette hingewiesen (Yang et al., 2008; Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Dagegen sind einige passive Exoskelette bereits auf dem Markt erhältlich. Trotzdem ist die Unterstützung, die diese passiven Systeme bieten, begrenzt, da nur spezifische Körperregionen entlastet werden können. Auch die Unterstützung beim Heben schwerer Lasten ist nach wie vor beschränkt.

Exoskelette können als unterschiedliche Maßnahmen in einem Unternehmen eingesetzt werden. Neben ihrer Anwendung als technische Maßnahme könnten Exoskelette darüber hinaus als PSA oder Medizinprodukte genutzt werden. Je nach den vorgesehenen Anwendungen müssen verschiedene Zertifizierungen erworben werden. Diese Zertifizierungen stehen in engem Zusammenhang mit Fragen der Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz.

## Zertifizierungen von Exoskeletten

Aufgrund ihrer zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Rehabilitation, Industrie und Militär sowie ihrer verschiedenen Konstruktionstypen gibt es nach wie vor keine einheitliche Regulierung oder Zertifizierung von Exoskeletten. Um diese Lücke zu schließen, müssen zunächst ihre funktionelle Gestaltung und ihre bestimmungsgemäße Verwendung betrachtet werden. In dieser Hinsicht kann ein Exoskelett als ein technisches Hilfsmittel klassifiziert werden, zur Erleichterung von Arbeitsprozessen. Wenn ein Exoskelett als Schutzmaßnahme vor physischer Belastung eingesetzt wird, kann es jedoch auch als PSA definiert werden. Derzeit wird jedoch kontrovers diskutiert, ob Exoskelette überhaupt einen ausreichend Schutz vor MSE bieten können, wodurch eine Klassifizierung erschwert wird.

Die praktische Anwendung von Exoskeletten steht in engem Zusammenhang mit der jeweiligen Zertifizierung. Wie bereits erwähnt, kann ein Exoskelett aufgrund der Vorschriften der Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) als technisches Hilfsmittel definiert werden. Aktive Systeme können ferner über die Sicherheitsanforderung für Industrieroboter (ISO 10218-1:2011) und persönliche Assistenzroboter (ISO 13482:2014) definiert werden.

Wenn ein Exoskelett als PSA zertifiziert ist, kann es auf Grundlage der europäischen Richtlinie 89/686/EWG zu präventiven Zwecken für die Vermeidung von arbeitsbedingten Verletzungen oder Verletzungen durch Überbeanspruchung eingesetzt werden. Es sollte erwähnt werden, dass die Richtlinie 89/686/EWG nach und nach in die neue PSA Verordnung (EU) 2016/425 überführt wird.

Und schließlich kann ein Exoskelett gemäß der entsprechenden europäischen Richtlinie (93/42/EWG) als Medizinprodukt betrachtet werden. Medizinprodukte müssen hohe Standards erfüllen, damit ihre Sicherheit und Leistung gewährleistet ist. Eine Herausforderung ist die Bewertung der medizinischen Wirksamkeit, die nach wie vor schwierig nachzuweisen ist. All diese Anforderungen sind jedoch notwendig, um Exoskelette zu Rehabilitationszwecken oder für medizinische Anwendung einzusetzen oder sie im Rahmen der Inklusion zu nutzen (Schick, 2018).

## Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz mit Exoskeletten

Arbeitgeber sind allgemein verpflichtet, eine sichere und gesunde Arbeitsumgebung zu schaffen und potenzielle Risiken während der Arbeit zu minimieren. Gefährdungsbeurteilungen am Arbeitsplatz, die mögliche berufsbedingten Gefahren berücksichtigen, sind obligatorisch und müssen von allen Arbeitgebern in Europa vorgenommen werden. Gemäß den europäischen Leitlinien, die ausgearbeitet wurden, um den Pflichten der Gefährdungsbeurteilung der Rahmenrichtlinie (89/391/EWG) Rechnung zu tragen, werden konkrete Maßnahmen beschrieben. Zu diesen Maßnahmen zählen die Prävention berufsbedingter Risiken, die Bereitstellung von Informationen und Schulung für Beschäftigte sowie die Mittel zur Umsetzung der notwendigen Maßnahmen. Auf der Grundlage dieser Vorschriften müssen mögliche Risiken im Zusammenhang mit Exoskeletten an Arbeitsplätzen berücksichtigt werden.

Die potenziellen Risiken von Exoskeletten in Arbeitsumgebungen sind zahlreich und hängen mit ihrer Konstruktion und Funktionalität zusammen. Aktive Systeme können mit mechanischen und technischen Defekten einhergehen. In diesem Fall ist es vorstellbar, dass Fehlfunktionen zu Verletzungen führen, da durch den Antriebsmechanismus aktiver Exoskelette zusätzliche Kräfte auf den Körper ausgeübt werden. Aktuell sind die Kräfte von aktiven Exoskeletten in Zusammenhang mit Verletzungen nur schwer einzustufen. Diesbezüglich wäre es möglich biomechanische Grenzwerte kollaborativer Roboter (ISO/TS 15066:2016) zu berücksichtigen (Schick, 2018). Darüber hinaus ist vorstellbar, dass Exoskelette das Verletzungsrisiko beim Ausrutschen, Stolpern oder Stürzen erhöhen können. Kim et al. (2018) zeigte in einer Untersuchung, dass ein Exoskelett für den Oberkörper jedoch nur einen geringen Einfluss auf das Sturzrisiko haben kann. Trotzdem sind Beschäftigte, je nach Konstruktion und Gewicht des Exoskeletts, in ihrer natürlichen Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Dies macht es schwieriger, bei einem Sturz das Gleichgewicht durch ausgleichende Bewegungen wiederzuerlangen. Die Folgen könnten schwerwiegender sein als ohne ein Exoskelett. Darüber hinaus müssen mögliche Kollisionen zwischen einem Exoskelett und Arbeitsausrüstung, Robotern oder Baumaschinen berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wurden bereits Computersimulationen durchgeführt, um die praktischen Anwendungen von Exoskeletten in virtuellen Fabrikumgebungen zu untersuchen (Constantinescu et al., 2016). Dabei wurden mehrere Einschränkungen erwähnt die, beim Einsatz von Exoskeletten, eine Umgestaltung der Arbeitsplätze notwendig machen würden. Des Weiteren müssen in Notfällen die Gebäude schnell evakuiert werden, um die Sicherheit und Gesundheit aller Beschäftigten zu gewährleisten. Es ist daher essentiell ein schnelles Ausziehen des Exoskeletts zu

ermöglichen. Entwickler sollten außerdem Situationen berücksichtigen, in denen die Beschäftigten dabei möglicherweise allein sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Sicherheits- und Gesundheitsgefahren von Exoskeletten in Szenarien abgeschätzt werden können, konkrete Aussagen jedoch noch nicht möglich sind. Ein Grund dafür ist der begrenzte Umfang an wissenschaftlichen Daten (Schick, 2018) und der Mangel an praktischer Erfahrung. Insbesondere ist nicht bekannt, welche langfristigen Auswirkungen Exoskelette auf den Bewegungsapparat haben. Infolgedessen müssen umfassende Studien durchgeführt werden, die personenbezogene, physiologische, medizinische und biomechanische Aspekte von Exoskeletten berücksichtigen.

## Bewertung von Exoskeletten

Die Vorteile und Nachteile von Exoskeletten sind in der Literatur derzeit umstritten. Im Allgemeinen bieten sie vielfältige Forschungsmöglichkeiten, deren Ergebnisse genutzt werden können, um Arbeitsbedingungen zu verbessern und arbeitsbedingte MSE zu reduzieren, die häufig mit mLH einhergehen (Hensel et al., 2018). Jedoch sind die körperlichen Anforderungen bezüglich des Muskel- und Skelettsystems nicht die einzigen zu berücksichtigenden Aspekte. Auch physiologische Parameter, z. B. Blutdruck, Sauerstoffverbrauch und Herzfrequenz sowie Auswirkungen auf das soziale Umfeld werden diskutiert.

### Physiologische Aspekte

Das Tragen einer externen Struktur wie die eines Exoskeletts kann auch physiologische Auswirkungen haben. In der Literatur wurde bereits diskutiert, dass das zusätzliche Gewicht eines Exoskeletts möglicherweise die Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems erhöht (Theurel et al., 2018), wengleich nach wie vor wenig über die Auswirkungen bekannt ist. Grundsätzlich steigt der Energiebedarf, je mehr Gewicht am Körper zu tragen ist. Trotzdem ist der Energieverbrauch stark von Geschlecht, Gehgeschwindigkeit und Körpergewicht abhängig (Holewijn et al., 1992). Im Gegensatz dazu konnten Whitfield et al. (2014) nachweisen, dass eine ergonomische Hebehilfe den Sauerstoffverbrauch während repetitiver Aufgaben nicht erhöht, obwohl die zusätzliche Masse der Hebevorrichtung berücksichtigt wurde. Darüber hinaus stehen diese Ergebnisse im Einklang mit den Erkenntnissen verschiedener Forschergruppen, die keine Veränderungen der Herzfrequenz von Versuchsteilnehmern zeigten, die eine persönliche Hebevorrichtung trugen (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Als Schlussfolgerung für industrielle Anwendungen empfahlen Whitfield et al. (2014), dass persönliche Hebevorrichtungen nicht verwendet werden sollten, um den Umfang der Arbeitsaufgaben zu erhöhen. Neben der mechanischen Struktur und Funktion eines Exoskeletts haben Arbeitsaufgaben, z. B. dynamische oder statische Bedingungen, ebenfalls Einfluss auf den Energiestoffwechsel und machen es noch schwieriger, allgemeine Aussagen zu treffen. Unter bestimmten Bedingungen können Exoskelette jedoch die Muskelermüdung reduzieren und damit die Gesundheit von Beschäftigten erhalten, da die Muskelermüdung als ein potentielles Verletzungsrisiko gilt (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Eine dauerhafte Unterstützung kann jedoch auch negative Langzeitfolgen für den Bewegungsapparat haben. Es ist vorstellbar, dass es zu einer Reduzierung der Muskelmasse und somit zu einer Verringerung der Körperkraft kommt. Diese Auswirkungen sind jedoch stark von der Unterstützungskraft des Exoskeletts abhängig.

Des Weiteren könnten Druckpunkte in den Bereichen entstehen, in denen das Exoskelett am Körper anliegt. Dies kann im Laufe der Zeit zu Beschwerden führen. Darüber hinaus ist es vorstellbar, dass externer Druck auf Blutgefäße durch Riemen oder Gürtel den Blutfluss zu den entsprechenden Körperteilen reduziert. Auch die Herzfrequenz und der Blutdruck könnten, durch die Verwendung eines Exoskeletts, bei repetitiven Tätigkeiten über Kopf verändert werden. Und schließlich sind Hautreizungen durch Reibung oder allergische Reaktionen möglich. Diese Faktoren sind jedoch gegenwärtig rein spekulativ und sollten mit Vorsicht betrachtet werden.

### Akzeptanz der Benutzer und psychosoziale Auswirkungen

Es ist zu berücksichtigen, dass wengleich die physikalischen Auswirkungen von Exoskeletten den Beschäftigten beeinflussen können, die Akzeptanz der Benutzer ebenfalls eine erhebliche Rolle im

Arbeitsumfeld spielen kann. Gerade beim Einsatz über längere Zeiträume ist die Akzeptanz eines Exoskeletts entscheidend. Bisher wurden einige Forschungsprojekte unter Berücksichtigung subjektiver Bewertungen von Exoskeletten durchgeführt, um die Akzeptanz von Technologie zu untersuchen (Gilotta et al., 2018; Hensel et al., 2018). Auch wenn Exoskelette von vielen Benutzern positiv beurteilt werden, zeigten Hensel et al. (2018), dass ihre Akzeptanz im Laufe der Zeit abnehmen kann und stark mit Komfort und Benutzerfreundlichkeit zusammenhängt. Der Komfort stellt einen der problembehaftetsten Aspekte dar und könnten einer breiten Anwendung an industriellen Arbeitsplätzen im Wege stehen (Bosch et al., 2016). Erneut muss erwähnt werden, dass diese Bewertungen in hohem Maße mit bestimmten Aufgaben zusammenhängen und daher keine allgemeinen Aussagen über Exoskelette getroffen werden können. Trotzdem legen die Erkenntnisse nahe, dass Entwickler Funktionalität und Gewicht sowie die ergonomische Aspekte von Exoskeletten berücksichtigen sollten. Darüber hinaus ist es vorstellbar, dass sich Beschäftigte weniger wertgeschätzt fühlen, wenn sie zur Ausführung ihrer täglichen Aufgaben ein Exoskelett verwenden, da ihre eigene körperliche Leistungsfähigkeit ohne Exoskelett als unzureichend angesehen werden könnte. In diesem Zusammenhang erwähnten Gilotta et al. (2018) soziale Aspekte als einen Faktor, der die Akzeptanz von Exoskeletten reduzieren könne.

## Biomechanische Aspekte

Derzeit gibt es zahlreiche Studien, die zeigen, dass Exoskelette die körperliche Beanspruchung in lokalen Körperbereichen wie den Schultergelenken oder der unteren Wirbelsäule reduzieren können (Abdoli-E et al., 2006; Graham et al., 2009; Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016; Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). Gleichzeitig kann es jedoch relevant sein, dass die Umverteilung der körperlichen Belastung zu höherer Beanspruchungen in anderen Körperregionen führt, wenn Kräfte nicht in den Boden abgeleitet werden können (Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). In diesem Zusammenhang fanden Weston et al. (2018) heraus, dass ein Oberkörper-Exoskelett die Beanspruchung für die Lendenwirbelsäule erhöht. Auch Theurel et al. (2018) konnte höhere Muskelaktivität in anderen Körperregionen oder sich verändernder Bewegungsmuster beobachten. Des Weiteren hat das zusätzliche Gewicht eines Exoskeletts nicht nur Auswirkungen auf die Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems, sondern bewirkt außerdem eine Verschiebung des Körperschwerpunktes, was wiederum Einfluss auf die Muskelaktivität des Benutzers hat. Es bleibt zu berücksichtigen, dass Fragen der biomechanischen Forschung häufig auf sehr spezielle Bewegungen und Muskelaktivitäten gerichtet sind und nicht allgemeingültige Aussagen zu Exoskeletten ermöglichen. Nichtsdestotrotz können sie auf den Mangel an Funktionalität aufgrund mechanischer Effekte bestimmter Exoskelette sowie deren Folgen auf Belastung und Beanspruchung des Körpers eingehen.

## Herausforderungen für die Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz

Bei der Einführung neuer Technologien am Arbeitsplatz ist stets eine kritische Beurteilung notwendig, um die Sicherheit und Gesundheit für die Beschäftigten nicht zu gefährden. Im Allgemeinen ist eine auf den Menschen ausgerichtete Arbeitsplatzgestaltung gemäß der Rahmenrichtlinie (89/391/EWG) eine grundlegende Voraussetzung. Im engeren Sinne bedeutet dies, dass gut gestaltete Arbeitsplätze keine zusätzlichen Maßnahmen, wie z. B. ein Exoskelett, erfordern. Aufgrund der aktuellen Arbeitssituation in Europa, die eine hohe Anzahl arbeitsbedingter MSE aufweist, scheinen ergonomische Arbeitsbedingungen jedoch nicht selbstverständlich zu sein. Um gute Arbeitsumgebungen zu gewährleisten, sind technische, organisatorische und personenbezogene Maßnahmen gemäß der Rahmenrichtlinie (89/391/EWG) zu berücksichtigen. Hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit ist eine hierarchische Anwendung obligatorisch. Wenn alle technischen Maßnahmen erschöpft sind, z. B. der Einsatz von Hebehilfen oder die Umgestaltung eines Arbeitsplatzes, müssen organisatorische Aspekte wie die Umstrukturierung von Arbeitsprozessen berücksichtigt werden. Als letzter Punkt können persönliche Maßnahmen in Betracht gezogen werden, um Beschäftigte zu schützen.

Wie bereits erörtert, können Exoskelette als technische Hilfsmittel oder Medizinprodukte beschrieben und darüber hinaus als PSA definiert werden. Ihre Klassifizierung ist stark von ihrer Anwendung, Konstruktion und bestimmungsgemäßen Verwendung abhängig. Daher können Exoskelette derzeit nur von Fall zu Fall beurteilt werden. In der Praxis ist es vorstellbar, dass Exoskelette als technische

Hilfsmittel zur Erleichterung von Arbeitsprozessen eingesetzt werden. Wenn sie jedoch verwendet werden, um die Gestaltung eines Arbeitsplatzes zu verbessern, an dem ergonomische Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten vor Verletzungen durch Überbeanspruchung erforderlich sind, müssen sie als PSA betrachtet werden.

Künftig sollte die Bewertung von Exoskeletten in den traditionellen ergonomischen Ansatz (auf den Menschen ausgerichtete Gestaltung) integriert werden, da Exoskelette Auswirkungen auf Arbeitssituationen und organisatorische Aspekte haben.

## Beschäftigte

Die Benutzeranforderungen für Beschäftigte sind von der jeweiligen Klassifizierung des betreffenden Exoskeletts abhängig. Wenn Exoskelette als technische Vorrichtung zertifiziert sind, sind sie arbeitsplatzgebunden und können nicht in jeder vorstellbaren Arbeitssituation verwendet werden, es sei denn, sie wurden konkret für die jeweilige Anwendung geprüft. Technische Hilfsmittel sind jedoch keine persönlichen Maßnahmen, und ihre Verwendung ist freiwillig. Wenn ein Exoskelett als PSA zertifiziert ist, kann es eine gesetzlich vorgeschriebene Verwendung geben. In diesem Fall muss ein Beschäftigter mit einem Exoskelett ausgerüstet sein, solange er einer erhöhten Arbeitslast ausgesetzt ist.

## Arbeitgeber

Bei der Umsetzung und während des Betriebs müssen Arbeitgeber verschiedene Aspekte berücksichtigen. Im Vergleich zu technischen Hilfsmitteln bestehen bei PSA weitreichendere Hygienevorschriften. Demnach müssen ausreichend Reinigungsmittel oder Waschmaschinen verfügbar sein, um die Hygienestandards erfüllen zu können. Darüber hinaus muss jeder Beschäftigte, der an einem Arbeitsplatz tätig ist, an dem ein Exoskelett in Form von PSA vorgesehen ist, mit einem Exoskelett ausgerüstet werden, was zu Lagerungsproblemen führen kann. Weiterhin sind regelmäßige Anpassungen an die Körpermaße von Beschäftigten sowie mögliche MSE, Reaktionen des Herz-Kreislauf-Systems und leistungsbezogene Aspekte zu berücksichtigen. Als technische Hilfsmittel definierte Exoskelette sind optional und müssen nicht jedem Beschäftigten am Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt werden. Wenn sie verwendet werden, sollten sie jedoch als Hilfsmittel (zur Unterstützung) und nicht als Weg zur Steigerung der Leistung oder Effizienz von Arbeitgebern angesehen werden.

## Politische Entscheidungsträger

Künftig sollten politische Entscheidungsträger die Regulierung von Exoskeletten bezüglich technischer Aspekte und ihrer Anwendung berücksichtigen, um die Zertifizierung der neuen Technologie zu erleichtern. So können Hersteller ihre Produkte eindeutiger klassifizieren, und Arbeitgebern wird die Verwendung von Exoskeletten für die von ihnen vorgesehenen Zwecke ermöglicht. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die bestimmungsgemäße Verwendung des Produkts und die entsprechende Zertifizierung stets in der Verantwortung des Herstellers liegen.



## Zusammenfassung

Das Thema „Exoskelette“ erhält derzeit erhebliche Aufmerksamkeit. Trotz ihres möglichen Potenzials sollte die weitverbreitete Anwendung von Exoskeletten in Frage gestellt werden. Gegenwärtig ist es ungewiss, ob Exoskelette in Zukunft häufiger zum Einsatz kommen, um Arbeitskräfte vor Verletzungen durch Überbelastung zu schützen oder um Arbeitsprozesse wirtschaftlicher zu gestalten. Je nach technischer Entwicklung könnten Exoskelette zukünftig an vielen Arbeitsplätzen benutzt werden oder ein Nischenprodukt für sehr spezielle Anwendungen bleiben. Das aktuelle kommerzielle Interesse an Exoskeletten kann jedoch auch ein Problem für die zukünftige Entwicklung darstellen, da leistungsorientierte oder wirtschaftliche Ansätze möglicherweise priorisiert werden. Exoskelette können je nach ihrer bestimmungsgemäßen Verwendung bei der Arbeit als technische Produkte, Medizinprodukte oder PSA angewendet werden. Aufgrund der Funktionalität, Konstruktion und Anwendung ist jedoch keine einheitliche Definition verfügbar, was die Einführung von Exoskeletten in der Praxis hinsichtlich ihrer Zertifizierung erschwert. Obwohl es zahlreiche Studien zu Exoskeletten gibt, die verschiedene Aspekte der Benutzerfreundlichkeit und Funktionalität berücksichtigen, sind die Auswirkungen auf die Gesundheit der Beschäftigten derzeit unbekannt. Insbesondere ist nicht bekannt, welche Langzeitfolgen Exoskelette auf physiologische, psychosoziale und biomechanische Parameter haben. Zukünftige Studien sollten vor diesem Hintergrund auf die praxisorientierten Langzeitfolgen von Exoskeletten am Arbeitsplatz eingehen. Es sollte erwähnt werden, dass die Verwendung von Exoskeletten zur Verbesserung der ergonomischen Gestaltung an ortsfesten Arbeitsplätzen nicht empfohlen werden kann, es aber zahlreiche mobile Arbeitsplätze gibt, in denen nur wenige ergonomische Maßnahmen umgesetzt werden können. In diesem Zusammenhang können Exoskelette in Zukunft einen vielversprechenden Ansatz zur Reduzierung arbeitsbedingter MSE bieten.

*Verfasser: Peters, M. und Wischniewski, S. (2019). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Deutschland.*

*Projektmanagement: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA), 2019*

*Wir danken Dr. Lars Adolph, Professor Dr. Ute Latza und der Gruppe der Focal Points der EU-OSHA für ihre kritischen Prüfungen und hilfreichen Vorschläge. Außerdem bedanken wir uns bei EUROFOUND für die Nutzung der Illustrationen in diesem Artikel.*

*Dieser Artikel wurde von der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz (EU-OSHA) in Auftrag gegeben. Die Inhalte, einschließlich aller geäußerten Meinungen und/oder Schlussfolgerungen, sind ausschließlich diejenigen der Verfasser und geben nicht zwingend die Auffassung der EU-OSHA wieder.*

*In dieser Publikation wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.*

## Literatur

- 89/391/EWG. Richtlinie des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit. Rat der Europäischen Gemeinschaften.
- 89/686/EWG. Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1989 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für persönliche Schutzausrüstungen. Rat der Europäischen Gemeinschaften.
- 93/42/EWG. Richtlinie 93/42/EWG des Rates vom 14. Juni 1993 über Medizinprodukte. Rat der Europäischen Gemeinschaften.
- 2006/42/EG. Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union.
- 2016/425. Verordnung (EU) 2016/425 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG des Rates. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. and Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456-465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. and Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94-106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), 356-373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. and de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212-217.
- Collins, J. D. and O'Sullivan, L. W. (2015). Musculoskeletal disorder prevalence and psychosocial risk exposures by age and gender in a cohort of office based employees in two academic institutions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, 85-97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. and Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments. *Procedia CIRP*, 50, 508-511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. and O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59 (5), 671-681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité. Retrieved from INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et integration d'un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité. Retrieved from INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound. (2012). *Fünfte Europäische Erhebung über die Arbeitsbedingungen*. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.
- Eurofound. (2019). *Europäische Erhebung über die Arbeitsbedingungen 2015*. Brüssel: Eurofound. Abgerufen von Eurofound: <https://www.eurofound.europa.eu/data/european-working-conditions-survey>.
- Gams, A., Petrič, T., Debevec, T. and Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), 1636-1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaud, L., Isoardi, M. and Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study*. Papier vorgestellt beim Kongress der International Ergonomics Association.

- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. and Lotz, C. A. (2009). Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1), 121-126.
- Gopura, R. A. R. C. and Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties*. Papier vorgestellt beim ICORR 2009: IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. and Stevenson, J. M. (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.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. and Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Betrieblichen Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, 654-661.
- Herr, H. (2009). Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6 (21).
- Holewijn, M., Hens, R. and Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear. *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), 129-134.
- ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices – safety requirements for industrial robots – part 1: robots. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- ISO 13482:2014. Robots and robotic devices – safety requirements for personal care robots. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – collaborative robots. Genf: Internationale Organisation für Normung.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. and Rashedi, E. (2018). 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.
- Liedtke, M. and Glitsch, U. (2018). Exoskelette – Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, 110-113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. and Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *Journal of Electromyography Kinesiology*, 19 (2), 331-340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), 266-269.
- 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.
- Viteckova, S., Kutilek, P. and Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), 96-105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. and Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, 101-108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. and Smallman, C. L. (2014). Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), 39-44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. and Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), 1599-1612.
- Zurada, J. (2012). Classifying the risk of work related low back disorders due to manual material handling tasks. *Expert Systems with Applications*, 39 (12), 11125-11134.