

Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Exoskeletten

Martin SCHMAUDER, Daniel GRÖLLICH, Christiane KAMUSELLA

*Professur für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Dresden
Dürerstr. 26, D-01307 Dresden*

Kurzfassung: Es besteht ein erhebliches Interesse an einsatzfähigen Exoskeletten, die die körperlichen Belastungen des Menschen reduzieren sollen. Exoskelette werden als am Körper getragene Assistenzsysteme definiert, die mechanisch auf den Körper einwirken. Passive Exoskelette kommen ohne jegliche externe Energiezufuhr aus, aktive Exoskelette benötigen einen elektrischen oder pneumatischen Antrieb. Das Anwendungsspektrum reicht vom militärischen bis zum rehabilitativen Bereich. Verschiedene Studien deuten darauf hin, dass Muskelskelettbelastungen bei unterschiedlichen Tätigkeiten durch die Verwendung von Exoskeletten reduziert werden können aber in anderen Körperregionen eine Belastungszunahme entsteht. Langzeitwirkungen für die Gesundheit der Anwendenden wurden bislang nur unzureichend untersucht. Auch Fragen bezüglich der Akzeptanz, Arbeitsleistung und spezifischen Sicherheitsstandards können anhand der gefundenen Literatur nicht beschrieben und eindeutig geklärt werden.

Schlüsselwörter: Exoskelettarten, Nutzerakzeptanz, Exoskeletteinsatz

1. Einführung

Trotz des anhaltenden Trends der Automatisierung und Mechanisierung in der Industrie sind viele Arbeitnehmer aufgrund von Lastenhandhabung (über 30% der Erwerbsbevölkerung in der EU), sich wiederholenden Bewegungen (63%) und ungünstigen Körperhaltungen (46%) immer noch physischen Belastungen ausgesetzt (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Die bisherigen Exoskelette wurden zunächst hauptsächlich in militärischen und rehabilitativen Anwendungen eingesetzt. Während im militärischen Bereich auf eine Erhöhung der körpereigenen Kraft abgezielt wird, ist die Hauptaufgabe im rehabilitativen Bereich das Ermöglichen von nicht mehr funktionierenden Bewegungen (Hölzel, Knott, Schmidtler, & Bengler, 2014). Die Herausforderung für die Wirtschaft, die Belegschaft möglichst lange und gesund im Arbeitsprozess zu halten, wird durch den demografischen Wandel und den zunehmenden Fachkräftemangel verstärkt. Exoskelette könnten neben z. B. ergonomischer Arbeitsgestaltung ein vorstellbarer Lösungsansatz sein, um diese Herausforderung zu bewältigen (Schick, 2018). In den letzten Jahren wurden die Assistenzsysteme aus diesem Grund für viele Tätigkeiten in der Arbeitswelt entdeckt und gewinnen zunehmend an Relevanz. Zum einen könnten sie zur Prävention von arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen eingesetzt werden, zum Anderen bietet es leistungsgewandelten Personen die Chance, weiterhin am „normalen“ Arbeitsalltag teilzunehmen (Steinhilber, Seibt, & Luger, 2018). Neben etlichen Chancen zur Verbesserung der Arbeitsqualität bringen Exoskelette ebenso Risiken mit sich. Es existieren Bedenken, dass Belastungsverlagerungen und Einschränkungen der Ar-

beitssicherheit entstehen. Außerdem werden die derzeit verfügbaren Systeme nur wenig akzeptiert (Steinhilber, Seibt, & Luger, 2018).

Bereits in den 1960er Jahren entwickelte das Unternehmen General Electric ein erstes Exoskelett zum Heben schwerer Lasten, den „Hardiman“. Dieses Modell war jedoch sehr unhandlich und somit keine wirkliche Entlastung. In den 1970er Jahren erarbeitete das Mihajlo Pupin Institut Serbia in Zusammenarbeit mit der Wisconsin-Madison Universität ein Exoskelett zur Unterstützung des Gehens. Die Firma Hocoma, welche sich mit der Entwicklung, Fertigung und dem Vertrieb von roboter- und sensorgestützten Geräten zur funktionellen Bewegungstherapie beschäftigt, entwickelte in den 2000er Jahren den „Locomat“, welcher physiologisches Gangtraining für Patienten mit schweren neurologischen Beeinträchtigungen ermöglicht.

Basierend auf den ersten Erkenntnissen und deren Erfolge wurden die Exoskelette immer mehr in den Fokus der Forschung gerückt. So entstanden aktive und passive Assistenzsysteme für die oberen und unteren Extremitäten. Weiterhin erfolgten erste Einsätze und Pilotversuche in der Industrie und Therapie. Möglicherweise werden sich die Exoskelette etablieren und so den Praxiseinsatz in der Industrie in den nächsten Jahren finden.

2. Definition Exoskelett

Ein Exoskelett ist ein am Körper getragenes Stützsystem, das den Menschen bei der Erzeugung der für manuelle Aufgaben erforderlichen physischen Energie unterstützt. Exoskelette können nützlich sein, wenn andere präventive Maßnahmen nicht realisierbar, nutzbar oder effektiv sind oder die Automatisierung wechselnder Tätigkeiten (z. B. Entladen loser Ladungen aus Containern, Behandlung von Patienten) nicht realisierbar ist (Bosch, van Eck, Knitel, & de Looze, 2016). Exoskelette zeigen eine hohe Vielfältigkeit in ihrer technischen und funktionellen Gestaltung auf. Um eine Charakterisierung dieser Systeme vorzunehmen, wird eine differenzierte Betrachtung angestrebt. Nach de Looze et al. (2016) kann eine Unterscheidung z. B. durch die Art der Energiebereitstellung, der unterstützten Körperregion oder der beruflichen Tätigkeit vorgenommen werden.

Exoskelette sind in der Lage, für einen Aufgabenbereich weitere Optionen im Handlungsspielraum oder verlorene Fähigkeiten, wie das Gehen, zurückzugeben. In den letzten Jahren nimmt das Interesse an der Entwicklung von Exoskeletten für die Anwendung im betrieblichen Umfeld immer mehr zu. Das wesentliche Ziel des Einsatzes von Exoskeletten im beruflichen Kontext ist dabei, körperliche Belastungen an den Belastungsgrenzen zu reduzieren, um Beanspruchungsreaktionen und Beschwerden der Beschäftigten zu verringern oder sogar zu verhindern und damit sekundär auch die Produktivität zu steigern (Kupfernagel, Boblan, & Haibel, 2018).

2.1 Bauarten und Eigenschaften

Bei den Bauarten von Exoskeletten wird zwischen Aktiven und Passiven unterschieden. Passive Exoskelette bieten eine (Teil-) Unterstützung der Körpersegmente bei bestimmten Haltungen und Bewegungen von Beinen, Rumpf und Armen. Es kann sowohl der ganze Körper als auch Kombinationen der einzelnen Körperteile stabilisiert werden. Die Konstruktion funktioniert mithilfe von mechanischen Federn, Gasdruckfedern und ggf. mit einer maximalen Beugewinkelbegrenzung, die jedoch nur als Stützfunktion aktiv wird. Teilweise sind die Funktionen schaltbar. Weiterhin

bedarf es keiner weiteren Energiezufuhr, da die benötigte Energie beim Beugen vorzugsweise durch die Schwerkraft und die teilweise Rückgewinnung beim Aufrichten entgegen der Schwerkraft gespeichert wird (Schick, 2018). Die auftretenden Kräfte und Belastungen werden stattdessen über eine Stützstruktur in weniger gefährdete Körperregionen oder in den Boden umgeleitet. Insgesamt sind passive Exoskelette auf Grund der fehlenden elektrischen oder pneumatischen Antriebstechnik leichter und preiswerter als aktive Exoskelette. Dadurch ist die Akzeptanz der Unternehmen deutlich größer, diese Systeme hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit und Benutzerfreundlichkeit an Arbeitsplätzen zu testen (Schick, 2018).

Eine differenziertere Unterscheidung erfolgt bei den aktiven Exoskeletten. Zum einen wird eine aktive (Teil-) Unterstützung der Beine, des Rumpfs und der Arme bei bestimmten Haltungen und bei Lastenhandhabung ermöglicht. Diese Körperregionen können auch kombiniert unterstützt werden. Mithilfe eines elektrischen oder pneumatischen Antriebs lässt sich eine einfache Regelung der Funktionen erzielen. Dabei ist die Stärke der Assistenz einstellbar. Die Energiezufuhr wird über einen Akku, Druckluft oder das Stromnetz sichergestellt. Im Unterschied zu der oben beschriebenen Exoskelettform gewährleisten manche Modelle eine aktive Vollunterstützung sowohl bei unterschiedlichen Körperhaltungen als auch bei Bewegungen inklusive Lastenhandhabung. Weiterhin ist es möglich, den ganzen Körper zu entlasten. Ähnlich wie zuvor funktionieren diese Exoskelette mittels eines elektrischen oder pneumatischen Antriebs, der jedoch mit einer komplexen Regelungs- und Steuerungsfunktion versehen ist. Diese werden mit Bewegungsprogrammen und neurophysiologischer Sensorik gesteuert. Die Energiezufuhr erfolgt wie oben beschrieben (Schick, 2018). Grundsätzlich bieten aktive Systeme eine höhere Kraftunterstützung.

Exoskelette können weiterhin auch nach den zu unterstützenden Körperteilen eingeteilt werden. Dabei wird von Exoskeletten des oberen oder unteren Körpers sowie des ganzen Körpers gesprochen. Zusätzlich existieren einige Einzelgelenk-Exoskelette (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016).

2.2 Einsatzbereiche

Der Einsatzbereich der Exoskelette ist breit gefächert und reicht von Anwendungen im militärischen Bereich bis hin zum rehabilitativen Bereich. Die Art der Anwendung von Exoskeletten hat direkten Einfluss auf die Funktionen, die diese Unterstützungssysteme beinhalten (Hölzel, Knott, Schmidtler, & Bengler, 2014).

Die ersten Exoskelette wurden bisher hauptsächlich im militärischen Bereich eingesetzt (Constantinescu, Muresan, & Simon, 2016). Damit soll die körpereigene Kraft erhöht werden, sodass die Soldaten/-innen schwere Lasten heben und tragen können (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Ein Beispiel hierfür ist das „Human Load Carrier“ (HULC) Exoskelett, welches von Martin Lockheed entwickelt wurde. Der hydraulisch angetriebene HULC ermöglicht es Soldaten/-innen, schwere Lasten mit minimaler Belastung für ihren Körper zu tragen. Es wird erwartet, dass das System Verletzungen des Bewegungsapparates reduziert, die bei den Streitkräften durch das Heben von Lasten auftreten (Technology, 2019).

Das Hauptanwendungsgebiet von Exoskeletten war für medizinische Zwecke bzw. Rehabilitationszwecke gedacht, bei denen die Systeme darauf abzielen, körperlich schwache, verletzte oder behinderte Menschen bei einer Vielzahl von Bewegungen zu unterstützen, die mit alltäglichen Aktivitäten wie Gehen, Begehen von Treppen und Sitzen verbunden sind (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). In diesem Bereich gibt es bereits eine Vielzahl von Anwendungen wie beispielsweise

das Modell „ReWalk Personal 6.0“ der Firma ReWalk Robotics GmbH. Dieses aktive Exoskelett nimmt Beugungen des Oberkörpers wahr und initiiert so den ersten Schritt. Weiterhin ist es möglich, dass die Steuerung des Exoskeletts von den Nervensignalen des Menschen übernommen wird, die von Sensoren aufgezeichnet und anschließend verarbeitet werden. Diese Signale werden an elektrische Motoren im Bereich der Gelenke geleitet, um somit eine gezielte Muskelbewegung anzusteuern. Zum Einsatz kommt das System bei Rückenmarksverletzungen. (Hölzel, Knott, Schmidler, & Bengler, 2014). Aktuelle Untersuchungen und Studien zum Nachweis von Therapieeffekten befinden sich jedoch noch in den Anfängen.

Grundsätzlich kann der Einsatz von Exoskeletten geeignet sein für sowohl Personen ohne gesundheitliche Risiken, Einschränkungen oder körperlichen Fähigkeitseinschränkungen des Bewegungsapparates, als auch für Personen mit gesundheitlichen Risiken für den Bewegungsapparat. Bei Personen mit (vorübergehenden) gesundheitlichen Einschränkungen des Bewegungsapparates oder bei (permanenten) körperlichen Fähigkeitseinschränkungen des Bewegungsapparates kommen vor allem Exoskelette zum Einsatz, die der Rehabilitation dienen (DGUV, 2018).

Die zunehmende Vielfalt der Assistenzsysteme, die unter dem Begriff Exoskelett zusammengefasst werden können, zeigt die Notwendigkeit einer Unterstützung des Menschen (Hölzel, Knott, Schmidler, & Bengler, 2014). Exoskelette sollen zukünftig vor allem dort zum Einsatz kommen, wo menschliche Arbeit nicht sinnvoll durch Automatisierung oder Robotik-Systeme ersetzt werden kann. Deswegen nehmen Exoskelette in der Industrie einen immer größer werdenden Stellenwert ein. In der zukünftigen Produktion wird der Mensch dort, wo es möglich ist, von ergonomisch ungünstigen Arbeiten durch Produktumgestaltung, Umgestaltung des Arbeitsplatzes oder organisatorische Änderungen entlastet. In der Fertigung und Montage müssen immer noch viele körperlich belastende Tätigkeiten von Menschen ausgeführt werden, ebenso beispielsweise in der Automobilbranche, im Baugewerbe und im Pflegebereich. In der Logistik, d. h. bei der Gepäckhandhabung oder beim Kommissionieren, gibt es bisher keine befriedigende Alternative zur manuellen Arbeit. In diesen Bereichen besteht großes Potenzial für den Einsatz von körpergetragenen Hebehilfen, um die Beschäftigten zu entlasten. Exoskelette sind vor allem dort sinnvoll, wo schwere Lasten manuell bewegt oder Tätigkeiten in Zwangshaltung durchgeführt werden. Bei nicht stationären Arbeitsplätzen ist dies oft der Fall, z. B. bei der Möbelauslieferung oder im Rettungsdienst. An stationären Arbeitsplätzen sind häufig Tätigkeiten in Zwangshaltung vorzufinden. Außerdem können sie Anwendung finden, wenn technische Hilfsmittel, wie Gabelstapler, Kran, Vakuumheber etc. nicht zum Einsatz geeignet sind. Generell sollten die Unternehmen immer darauf bedacht sein, die Arbeitsplätze ergonomisch zu gestalten (Schick, 2018). Der Grundgedanke hinter dem Einsatz von Exoskeletten in der Industrie ist, die Arbeitenden bei der Manipulation schwerer Lasten mit intelligenten Werkzeugen zu unterstützen, die Produktivität zu steigern und körperliche Belastungen für die Mitarbeitenden zu senken. Die Mitarbeitenden werden auch in der Lage sein, ihre natürlichen Sinne und Bewegungen zur Steuerung einzusetzen, ohne eine besondere Ausbildung in Robotersystemen oder Programmiersprachen zu haben (Constantinescu, Muresan, & Simon, 2016). Der Einsatz von Exoskeletten an Produktionsarbeitsplätzen ist noch nicht sehr verbreitet. Tests von Prototypen im industriellen Kontext werden bereits immer mehr durchgeführt (DGUV, 2018).

2.3 Aspekte der Arbeitssicherheit

Aus der Sicht des Arbeitsschutzes besteht bisher das Problem darin, dass es keine Produktnormen für Exoskelette gibt. Aus diesem Grund wird an verschiedenen Lösungsansätzen gearbeitet. Das bedeutet z. B., dass Normen weiter konkretisiert und Begrifflichkeiten vereinheitlicht werden müssen (Schick, 2018). Eine erste Initiative dazu erfolgt vom DIN im September 2019. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die sicherheitstechnischen Anforderungen an Exoskelette im Wesentlichen vom Einsatzzweck abhängig sein werden. Derzeit wird über die Zuordnung von Exoskeletten zum Geltungsbereich einer EU Richtlinie diskutiert.

Für die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2018) wäre es denkbar, dass Exoskelette als technische Hilfsmittel zur RL 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie) zugeordnet werden können. Im Anhang 1 der Maschinenrichtlinie werden beispielweise verbindliche Schutzziele definiert. Darauf aufbauend können diese bereits Anhaltspunkte für die Vermeidung von Gefährdungen für Sicherheit und Gesundheit beim Einsatz von Exoskeletten geben. In Deutschland wird diese EG-Richtlinie durch die Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz in nationales Recht umgesetzt. Die europäische Richtlinie 93/EWG für Medizinprodukte und das Medizinproduktgesetz (MPG) könnten bei der Verwendung als medizinisches Hilfsmittel, etwa im Rahmen der beruflichen Wiedereingliederung oder Inklusion in Deutschland zur Anwendung kommen. Da Exoskelette laut den Entwickelnden und Herstellenden auch für Präventionsmaßnahmen geeignet sind, liegt eine Einordnung als personen- gebundene und personenbezogene Maßnahme nahe, die Beschäftigte vor einer Überlastung durch Hebe- oder Tragetätigkeiten oder durch Tätigkeiten mit Zwangshaltungen schützen sollen. Deshalb ist auch eine Zuordnung zur Richtlinie 89/686/EWG (Persönliche Schutzausrüstung) möglich. Nach der Maßnahmenhierarchie des Arbeitsschutzes stehen Exoskelette an vorletzter Stelle in der Hierarchie der Schutzmaßnahmen. Das bedeutet, dass zunächst alle technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Gefährdungsreduzierung ausgeschöpft werden müssen, bevor ein Assistenzsystem eingesetzt wird (Schick, 2018). Detaillierte sicherheitstechnische Anforderungen für Exoskelette festzulegen wäre demnach erst auf Grund des Einsatzzweckes und der daraus resultierenden Zuordnung zu einer der Richtlinien möglich (DGUV, 2018).

3. Bisherige Erkenntnisse

Derzeit erscheinen insbesondere die aktiven Exoskelette mit dem Status eines Prototyps oder Funktionsmusters noch eher als unausgereift (Huysamen, et al., 2018). In dem Beitrag „Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen“ (2018) von Ralph Hensel und Matthias Kell geht es aus diesem Grund um die Ergebnisse von drei verschiedenen passiven Exoskeletten für den Einsatz zur Beinunterstützung bei Stehtätigkeiten, Rückenunterstützung bei Lastenmanipulation sowie statischer Haltnungsarbeit und Überkopftätigkeiten. Um die Begrifflichkeit des hier genannten Exoskelettes zu definieren, definieren die Autoren diesen wie folgt:

Als Ergoskelette werden bei Audi körpergetragene Assistenzsysteme verstanden, die durch eine mechanische Einwirkung auf den Körper die Beanspruchung der Mitarbeiter bei physischer Arbeit optimieren, wenn technische und organisatorische Gestaltungsmittel ausgeschöpft sind (Hensel, Keil, & Bawin, 2018).

In den folgenden Ausführungen werden die Ergebnisse des Beitrags im Überblick zusammengefasst, da die aus Feldstudien gewonnenen Erkenntnisse aktuell für die Arbeitswissenschaft relevant sind.

3.1 Feldstudie 1: Passives Exoskelett zur Rückenunterstützung

Das passive Exoskelett Laevo soll sowohl bei dynamischen Umsetzvorgängen als auch statischer Haltungsarbeit in vorgebeugter Körperhaltung die Belastung des unteren Rückens reduzieren. 30 männliche Probanden testeten in einer vierwöchigen Feldstudie das Assistenzsystem bezüglich seiner Eignung in Produktion und Logistik. Zu Beginn der Studie wurden Hypothesen aufgestellt, die im Anschluss mithilfe einer anonymen, empirischen Fragebogenuntersuchung im Vorher-Nachher-Vergleich überprüft wurden. Für die Evaluation bei statischen Tätigkeiten wurden Arbeitsplätze in der Fahrzeugmontage, an Fertigungslinien mit unterschiedlichen Taktzeiten, im Presswerk, in der Werkzeugwartung und bei Rüstvorgängen ausgewählt. In der Logistik wurde der Einsatz bei dynamischen Arbeiten überprüft.

Nach Beendigung des Einsatzes des Laevo-Exoskelettes sind die Ergebnisse positiv bezüglich der wahrgenommenen Entlastung im unteren Rücken zu beurteilen. Für statische Tätigkeiten ist diese jedoch höher zu bewerten als bei dynamischen. Allerdings stellte sich heraus, dass es einen Anstieg der Beanspruchung in anderen Körperregionen und somit eine Lastumverteilung gab, vor allem in der Brustregion sowie leicht im Bereich der Oberschenkel. Eine zusätzliche Beanspruchung merkten die Probanden in der Logistik maßgeblich im Bereich der Schultern und des Nackens. Des Weiteren zeigt sich, dass die Nutzerakzeptanz mit steigendem Diskomfortempfinden und sinkender Usability abnimmt. Festzuhalten ist, dass diese Feldstudie zum einen das Potenzial des Laevo-Exoskelettes zur Rückenunterstützung zeigt, andererseits jedoch Schwachstellen in der Konstruktion offenbart, die der Nutzerakzeptanz und damit dem Einsatz im Weg steht. Weiterhin ist zu vermerken, dass sich ein erhöhter Diskomfort im Bereich der Brust bei weiblichen Nutzern aufgrund des Brustpads erwarten lässt. Aus diesem Grund ist es notwendig, ein breiteres Testpersonenkollektiv zu wählen, sodass sich auch diesbezüglich Erkenntnisse bei der Nutzung gewinnen lassen.

3.2 Feldstudie 2: Passives Exoskelett zur Beinunterstützung

In dieser Feldstudie wurde der Chairless Chair getestet. Dieses passive Exoskelett soll einerseits die Entlastung der Beine bei Stehtätigkeiten gewähren und andererseits helfen, Zwangshaltungen vorzubeugen. Das System wird von den Nutzenden mit einem Gürtel und einer optionalen Weste am Körper getragen, sodass diese während der Tätigkeit absitzen können. Das Gewicht der Nutzenden wird hierbei in den Boden eingeleitet. An dieser Studie nahmen zehn Testpersonen teil, deren Arbeiten durch normalerweise ganztägiges Stehen in niedriger Arbeitshöhe und mit repetitiven Inhalten bei kurzen Taktzeiten geprägt sind.

Die Ergebnisse spiegeln eine Vielschichtigkeit bezüglich der Bewertung des tätigkeitsbedingten Beschwerdebildes wieder. Bei Beschwerden in Schultern, Oberarmen, Händen und dem unteren Rücken sowie dem Nacken kann der Chairless Chair zur Entlastung beitragen. Die Probanden gaben allgemein an, dass eine Entlastung der Beine stattgefunden hat, obwohl valide Aussagen aufgrund der kurzen Tragedauer nicht getroffen werden können. Es wurde bemängelt, dass es ein starkes Schwitzen unter der Weste gab, welches im Bereich der Schultern zu einem Diskom-

fort führte. Vor allem an Arbeitsplätzen ohne Taktbindung und Standardarbeitsplätzen hat sich das Exoskelett als geeignet erwiesen. Allerdings ist an Arbeitsplätzen mit längeren Distanzen, die gehend überbrückt werden müssen, vom Einsatz abzuraten. Weiterhin muss im Zuge einer Gefährdungsbeurteilung sichergestellt werden, dass die Gefahr des Stolperns und Stürzens ausgeschlossen werden kann. Der Chairless Chair trägt bis zu 70% des Körpergewichtes, sodass eine entscheidende Entlastung der Beine sowie Fuß- und Kniegelenke erzielt wird. Dennoch lässt eine erhöhte Muskelaktivität im Oberschenkel auf eine Lastumverteilung schließen. Fraglich ist demzufolge, ob eine langfristige Nutzung zu degenerativen Knieerkrankungen führen kann.

3.3 Feldstudie 3: Passives Exoskelett zur Überkopfarbeit

Exoskelette können bei Überkopftätigkeiten helfen, ein quasistatisches Gleichgewicht herzustellen, indem die Oberarme durch Schalen gestützt werden, sodass das Gewicht der Arme über eine Stützstruktur in die Hüfte eingeleitet wird. Damit soll die Beanspruchung der Mitarbeitenden reduziert werden. In dieser Feldstudie wurden die Exoskelette Levitate Airframe und ottobock PAEXO an Montagearbeitsplätzen einem Vergleich unterzogen. Beide Systeme wurden von acht männlichen Probanden für je zwei Wochen getestet. Basierend auf dem bereits beim Laevo-Exoskelett angewandten Fragebogen wurden Gebrauchstauglichkeit, Diskomfort, Nutzungstension und wahrgenommene Entlastung untersucht.

Auf Grund der geringen Probandenanzahl und der kurzen Tragezeit lassen sich keine repräsentativen Ergebnisse darstellen. Die Probanden meldeten jedoch eine Entlastung der Arm- und Schultermuskulatur zurück. Bei beiden eingesetzten Exoskeletten offenbarten sich konstruktive Schwachstellen, insbesondere im Bereich der Körperkontaktstellen. Zum Zeitpunkt der Feldstudie erzeugten beide Modelle Diskomfort bei den Probanden. Weitere Untersuchungen zeigten teilweise signifikante Beanspruchungsreduktionen im Bereich der oberen Extremitäten, aber auch einen Lastumverteilungseffekt. Hier berichteten die Probanden aber auch von einer Anpassung des Körpers an die erhöhte Belastungssituation (Nachlassen der Erschöpfungserscheinungen der Muskulatur) erst nach einem Zeitraum von ca. 2 – 4 Monaten nach erstmaliger Arbeitsaufnahme am Arbeitsplatz. (Hefferle u. a., 2019).

Insgesamt lässt sich sagen, dass alle Testpersonen allen untersuchten Assistenzsystemen ein hohes Entlastungsempfinden in den beanspruchten Körperregionen attestieren. Trotz der subjektiv wahrgenommenen Entlastung wurde die Nutzerakzeptanz eher niedrig bewertet. Vor allem das Schwitzen, die Reibung oder das Druckempfinden sowie das Gewicht selbst führten zu einem Diskomfort. Weiterhin kristallisierte sich ein negativer Einfluss auf die Arbeitsgeschwindigkeit heraus auf Grund der Behinderung bei der Ausführung der Tätigkeiten. Dennoch sind Exoskelette ein vielversprechender Ansatz, um die ergonomischen Bedingungen der Mitarbeitenden zu verbessern und tätigkeitsbezogene Muskel-Skelett-Erkrankungen vorzubeugen. Derzeit sind passive Exoskelette den Aktiven voraus, da sich die Passiven zumindest im Rahmen zahlreicher Pilotversuche im Einsatz befinden.

4. Diskussion

Wie in den Studien bereits angedeutet birgt der Einsatz von Exoskeletten sowohl Chancen als auch Risiken. Einige passive industrielle Exoskelette zielen darauf ab, den unteren Rückenbereich zu stützen oder zu entlasten, und scheinen hier sowohl

für das dynamische Heben als auch für das statische Halten recht erfolgreich zu sein. Es wurden jedoch einige Bedenken hinsichtlich der potenziell negativen Auswirkungen von zunehmender Beinmuskelaktivität, sozusagen Lastumverteilung und Muskeldeconditionierung geäußert (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Andere Systeme hingegen, die eine Beinunterstützung erzielen sollen, erwiesen sich an statischen Arbeitsplätzen als durchaus geeignet, währenddessen sich bei dynamischen Bewegungen Behinderungen im Arbeitsfluss abzeichneten. Bei aktiven Exoskeletten scheint der potenzielle Effekt bei der Verringerung der körperlichen Belastung noch höher zu sein. Sowohl Unterkörper- als auch Rumpf- und Oberkörperregionen könnten von einer starken Verringerung der Belastung profitieren (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Allerdings sind diese Assistenzsysteme bisher nur unzureichend erforscht und evaluiert.

Exoskelette haben somit das Potenzial, die zugrunde liegenden Faktoren, die mit der Entwicklung arbeitsbedingter Verletzungen des Bewegungsapparats verbunden sind, erheblich zu reduzieren. Die tatsächlichen Auswirkungen auf die potenzielle Verringerung der Prävalenz von Verletzungen müssen jedoch noch in Langzeitstudien ermittelt werden, da bis jetzt erhebliche technische Herausforderungen und das Fehlen spezifischer Sicherheitsstandards einer umfassenden Umsetzung am Arbeitsplatz im Wege stehen (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016).

Die Gewährleistung geeigneter Arbeitsplätze (Kollisionsfreiheit) sowie die Freiwilligkeit der Benutzung gilt es weiterhin zu bedenken. Arbeitswissenschaftliche Fragestellungen beschäftigen sich diesbezüglich mit der Arbeitssicherheit und dem Gesundheitsschutz, dem Einfluss auf die menschliche Biomechanik sowie soziale, ethische und rechtliche Aspekte. Derzeit ist es nicht möglich, Exoskelette in aktuellen Ergonomie-Bewertungsverfahren und -methoden zu berücksichtigen.

4.1 Chancen

In der modernen Industrie gibt es eine wachsende Tendenz zur Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, um einerseits den Einsatz von Robotern zu bessern und andererseits die Flexibilität des Menschen zu bewahren. Für manuelle Handhabungsaufgaben, die eine große Belastung des Menschen darstellen, könnte eine Lösung der Einsatz eines Exoskelettes sein. Der Hauptvorteil gegenüber jeder Art von Robotersystem (z. B. klassischer Roboter oder Vollautomatisierungssystemen) besteht darin, dass insbesondere in dynamischen Umgebungen voll und ganz von der Kreativität und Flexibilität des Menschen profitiert werden kann (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). In der Studie „The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work“ von Bosch et al. (2016) wurde die Wirkung eines passiven Exoskeletts der Firma laevo exoskelet auf die Muskelaktivität, Beschwerden und Ausdauer untersucht. Bei der simulierten Montageaufgabe wurde beim Tragen des Exoskeletts eine geringere Muskelaktivität und ein geringeres Unbehagen im unteren Rückenbereich festgestellt. Zusätzlich war die Muskelaktivität des Hüftextensors vermindert. Die Auswirkungen passiver Exoskelette auf die statische Rumpfbiegung wurden von Graham, Agnew und Stevenson (2009) sowie von Ulrey und Fathallah (2013) bereits untersucht. Beide Studien zeigten positive Auswirkungen auf die Rückenmuskelaktivität während der statischen Rumpfbeugung (Abnahme von 10 bis 25%) und auf die Belastung der Wirbelsäule (geschätzte Lumbalkompressionskraft um 12–13% verringert (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Aus kinematischen und Mess-Daten konnte geschlossen werden, dass die Muskelaktivität im unteren

Rückenbereich trotz der etwas stärkeren Rumpfbeugung im Gegensatz zur „Mit-Exoskelett-Haltung“ signifikant und wesentlich geringer war. Da die Aktivität der Rückenmuskulatur in engem Zusammenhang mit den Druckkräften der Wirbelsäule steht, konnte der Schluss gezogen werden, dass das getestete Exoskelett das Potenzial hat, die Belastung des Bewegungsapparates im unteren Rückenbereich bei Arbeitern, die sich über längere Zeiträume erstrecken, signifikant zu verringern. Ebenso führte die Verwendung eines passiven Exoskeletts zur Unterstützung der Schulterregion zu einer Verringerung der muskulären Beanspruchung in den oberen Extremitäten. In dieser experimentellen Laborstudie wurden drei verschiedene manuelle Tätigkeiten mit und ohne Exoskelett durchgeführt. Im Schulterbereich kam es dabei in zwei dieser Tätigkeiten zu einer klaren Reduktion der Muskelaktivität, in einer hingegen nur in der Tendenz. Daraus lässt sich schließen, dass ein passives Exoskelett eine wirksame Strategie zur Verringerung des Risikos für arbeitsbedingte Schmerzen im unteren Rücken- und Schulterbereich bei der Arbeit in Zwangshaltung darstellen kann (Bosch, van Eck, Knitel, & de Looze, 2016).

In der Ausarbeitung „Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load“ von de Looze et al (2016) wird neben den Auswirkungen passiver Exoskelette auch auf aktive Systeme eingegangen. Daraus resultiert, dass sich bei Experimenten mit statischem Halten und dynamischen Heben positive Effekte für einen großen Muskelbereich in den oberen Extremitäten einstellten. Dieses Ergebnis zeigt, dass aktive Exoskelette ebenso in der Lage sind, körperliche Belastungen von Schulter und Armen für eine Vielzahl beruflicher Tätigkeiten, u. a. Arbeiten in vorgebeugter Haltung oder Überkopfarbeit zu reduzieren. Die betrachteten Exoskelette unterscheiden sich stark in Bezug auf die unterstützten Körperstrukturen (entweder unterer, oberer oder ganzer Körper), die verwendeten Materialien und die Aktivierungsart. Somit sind sie für unterschiedliche Anwendungsfälle einsetzbar. Weiterhin kann gefolgert werden, dass ein Potenzial einer Verringerung der Muskelaktivität in den unteren Extremitäten (zum Beispiel beim Gehen und Treppensteigen), im Rücken (beim Heben und statischen Beugen) sowie in den Schultern und oberen Extremitäten (bei verschiedenen Arten von Handarbeit) vorhanden ist.

Ralf Schick sieht in seinem Beitrag „Einsatz von Exoskeletten in Arbeitssystemen: Stand der Technik – Entwicklungen – Erfahrungen“ (2018) den potentiellen Nutzen durch Exoskeletten in der Senkung physischer Belastungen am Arbeitsplatz und die Verringerung muskuloskelettaler Beschwerden. Außerdem können Fehlzeiten reduziert und der Arbeitskomfort erhöht werden. Möglicherweise können diese Faktoren zu einer Steigerung der Produktivität und Qualität führen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Einsatzmöglichkeiten leistungsgewandelter Menschen zu erhöhen.

D. Kuhn und B. Freyberg-Hanl schreiben in dem Artikel "Exoskelett: Therapiesystem oder Hilfsmittel zum Behinderungsausgleich" (2018), dass sich durch die Anwendung von Exoskeletten im rehabilitativen Bereich nicht nur positive Effekte auf die sensomotorischen Störungen zeigen, sondern auch auf Begleiterkrankungen der Grunderkrankung und die psychische Gesundheit. Derzeit wird die Exoskeletttherapie in der Rehabilitation von neurologischen Gangstörungen eingesetzt. Ein positiver Einfluss auf viele Körperfunktionen, wie z.B. die Magen-/Darmfunktion, die Blutdruckregulation, die Knochendichte, den Gewebestoffwechsel, sowie der Einfluss auf die muskuläre Spannungssituation/ Spastik werden vermutet, sind aber aktuell noch nicht nachgewiesen. Dennoch sehen Ärzte/-innen und Therapeuten/-innen eine deutliche Erweiterung von Therapieverfahren in der Behandlung von zentralen neurologischen Erkrankungen mithilfe der Assistenzsysteme.

4.2 Risiken

Neben den oben beschriebenen Chancen sollten auch Risiken erwähnt werden. In der Studie von Bosch et al. (2016) treten neben den bereits erwähnten positiven Effekten auch einige negative auf, die im Folgenden erläutert werden. Das Exoskelett führte zu mehr Beschwerden im Brustbereich, was eine Lastumverteilung zur Folge hat. In dem Experiment wurde beobachtet, dass die Knie des Probanden bei Verwendung des Exoskeletts überdehnt waren. Wenn diese Knieposition für längere Zeit eingenommen wird, kann dies ein Gesundheitsrisiko vom Rücken auf die Knie verlagern. Es sollte jedoch untersucht werden, ob dieses Phänomen mit der statischen Aufgabe und der spezifischen Einrichtung des Arbeitsplatzes zu tun hat und ob dies auch unter anderen, dynamischeren Umständen (bei denen die Menschen weniger an ihre Position gebunden wären) passieren würde. Ein weiteres Problem betrifft die mögliche Schwächung der Rückenmuskulatur. In einer Studie von Eisinger et al. (1996) über Lumbalorthesen wurde der Schluss gezogen, dass ein längerer Gebrauch dieser Orthesen zu einer Schwächung der Rumpfmuskulatur führen könnte. Daher wird empfohlen, entweder die Anwendungsdauer zu begrenzen oder die Anwendung mit Kräftigungsübungen zu kombinieren. Bei den Exoskeletten sollte beachtet werden, dass die Abnahme der Muskelaktivität signifikant, aber nur teilweise stattfand. Die Muskeln bleiben also aktiv, aber in geringerem Maße. Die Feldstudie „Chancen und Risiken für den Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis“ von Hensel et al. (2018), in der es ebenfalls um die Untersuchung des Laevo-Exoskelettes geht, wurden weitere Nachteile beschrieben. So wurde von den Testpersonen ein Diskomfort vor allem im Bereich der Körperkontaktstellen (Schultern, Brust und Oberschenkel) durch Schwitzen, Reibung und Druckempfinden sowie das Eigengewicht des Systems wahrgenommen. Dies scheint insbesondere bei längerer Tragedauer aufzutreten. Auch diese Studie beschreibt eine Lastumverteilung in Brust, Oberschenkel und Knie, sodass von einer dauerhaften Nutzung abgeraten wird. Generell wird vermutet, dass eine Lastumverteilung aufgrund der mechanischen Einwirkung auf den Körper möglich ist und zu negativen Langzeitfolgen, wie muskulären Dysbalancen führen kann. Die Zunahme der Beinmuskelaktivität bei passiven Exoskeletten könnte durch die Tatsache erklärt werden, dass externen Kräften, die durch das Gerät ausgeübt werden, entgegengewirkt werden muss, um das Gleichgewicht sowohl beim statischen Halten als auch beim dynamischen Heben zu erhalten (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Möglicherweise kann es auch zu negativen psychischen Effekten kommen, wie beispielsweise der Verlust der Selbstwirksamkeitserwartung. Etwaige Effekte lassen sich jedoch nur bedingt im Rahmen von Feldstudien oder arbeitspsychologischen Laborstudien testen. Weiterhin stellte sich heraus, dass die Behinderung bei der Ausführung von Nebentätigkeiten zu einer verminderten Akzeptanz führte (Bosch, van Eck, Knitel, & de Looze, 2016).

In einer anderen Studie von Constantinescu et al. (2016) wurden verschiedene berufliche Anwendungsfälle für Exoskelette mittels Computersimulation diskutiert. Es wurde herausgefunden, dass teilweise die Gefahr einer Kollision zwischen der Produktionsumgebung und Komponenten des Exoskeletts besteht. Demzufolge scheinen nicht alle Tätigkeiten für den Einsatz von Exoskeletten geeignet zu sein. Bisher gibt es nur wenige Hinweise darauf, dass die Arbeitsleitung durch die Verwendung eines Exoskeletts eingeschränkt wäre. Dennoch kann es bei einzelnen Tätigkeiten zu Leistungseinbußen im Sinne einer verlangsamten Tätigkeitsausführung kommen (Theurel, Roux, & Savescu, 2018). Allerdings sollten die Beschäftigten aufgrund der

Kraftunterstützung durch Exoskelette nicht weiterhin an der Belastungsgrenze arbeiten, indem die Lastgewichte erhöht werden (Schick, 2018).

Aus rechtlicher Sicht bestehen Vorbehalte der Unternehmen beim Einsatz von Exoskeletten, da die Erkenntnisse zu etwaigen negativen Langfristfolgen infolge einer Lastumverteilung fehlen. Für den praktischen Einsatz spielt neben Akzeptanz und Diskomfort vor allem auch die Gebrauchstauglichkeit der Systeme, nicht nur bei der Ausführung der Tätigkeit selbst, sondern auch bei Nebentätigkeiten sowie dem An- und Ablegen eine Rolle (Hensel & Keil, 2018). Grundsätzlich besteht bei aktiven Exoskeletten, die elektrisch oder pneumatisch angetrieben werden, die Gefahr einer Fehlfunktion bzw. eine Fehlbedienung, die zu Verletzungen führen kann. Demzufolge muss diese Gefährdung durch sicherheitstechnische Maßnahmen ausgeschlossen sein. Weiterhin können bei der Benutzung eines Exoskeletts Gefährdungen im Zusammenhang mit Stolper- oder Sturzunfällen entstehen. Auch deshalb muss eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden (Schick, 2018). Die Herausforderungen im rehabilitativen bzw. medizinischen Bereich sind zum einen die Ein- und Ausschlusskriterien, die Sicherheitsrisiken und die möglichen Überlastungen des muskuloskelettalen Systems zu sehen. Die Anwendenden können aufgrund der Behinderung im Fall eines Sturzes sich nicht selbst oder durch das System schützen. Bei der Anwendung eines Exoskeletts kann es zu Überlastungsschäden in muskuloskelettalen Strukturen, wie Haut, Gelenken, Muskeln, Sehnen und Bindegewebe kommen. Technische Grenzen sind durch das Medizinproduktegesetz gesetzt. Hinzu kommen die beträchtlichen Anschaffungskosten eines Systems (zwischen 50.000 und 100.000 €) und das zwingende Erfordernis einer fachärztlichen oder fachtherapeutischen Begleitung und Überwachung. Primär sollte das Exoskelett somit als Hilfsmittel zu sehen sein (Kuhn & Freyberg-Hanl, 2018).

4.3 Akzeptanz

Eine hohe Nutzerakzeptanz spielt eine zentrale Rolle bei der Implementierung von Exoskeletten in der Industrie (Steinhilber, Seibt, & Luger, 2018). Studien deuten darauf hin, dass die Beschwerden bei der Verwendung eines Exoskelettes in den zu unterstützenden Körperregionen abnehmen, gleichzeitig ergibt sich jedoch eine leichte Erhöhung bei der Beschwerdewahrnehmung im Exoskelett-Mensch-Schnittstellenbereich, d. h. dort, wo das Assistenzsystem in Kontakt zum Körper tritt (Bosch, van Eck, Knitel, & de Looze, 2016). Exoskelette müssen Druck auf den Körper ausüben, um zu funktionieren. Wenn diese Kontaktbereiche nicht sorgfältig geplant werden, kann es zu Beschwerden und möglicherweise zu Verletzungen kommen, die dazu führen können, dass die Tragenden das Exoskelett nicht verwenden möchten (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Die Anforderungen zur Erhöhung der Akzeptanz liegen u. a. in der ergonomischen und benutzerfreundlichen Gestaltung der Systeme. Um einen hohen Tragekomfort zu erzielen, sollte sich das Exoskelett individuell auf die Körperproportionen einstellen lassen. Ein geringes Eigengewicht ist zudem unabdingbar bei langer Tragezeit. Ein geringer Aufwand beim An- und Ablegen erzeugt eine einfache Handhabung. Weitere Anforderungen an ein Exoskelett sind die störungsfreie Funktion sowie die Wetter- und Umgebungstauglichkeit. Nebentätigkeiten sollten nicht erschwert und die Arbeitsgeschwindigkeit nicht verringert werden (Schick, 2018). Ferner sollten hygienische Mindeststandards eingehalten und Reinigungsintervalle vorgegeben werden, besonders für personalisierte Textilien im Bereich der Körperkontaktstellen (Hensel & Keil, 2018).

5. Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt auf, dass ein großes Interesse an aktiven und passiven Exoskeletten vor allem für industrielle Zwecke besteht. Festzustellen ist jedoch, dass sich die meisten Entwicklungen in einem frühen Forschungsstadium befinden (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Viele Konzepte wurden bisher nur in Laboren an jungen und gesunden Personen getestet. Passive industrielle Exoskelette zielen darauf ab, den unteren Rückenbereich zu stützen oder zu entlasten, und scheinen hier sowohl für das dynamische Heben als auch für das statische Halten recht erfolgreich zu sein. Es wurden einige Bedenken hinsichtlich der potenziell negativen Auswirkungen von zunehmender Beinmuskelaktivität, starken Beschwerden in anderen Körperregionen und Muskeldeconditionierung geäußert. Bei aktiven Exoskeletten scheint der potenzielle Effekt bei der Verringerung der körperlichen Belastung sogar noch höher zu sein. Sowohl Unterkörper- als auch Rumpf- und Oberkörperregionen könnten von einer starken Verringerung der Belastung profitieren. Exoskelette haben somit das Potenzial, die zugrunde liegenden Faktoren, die mit der Entwicklung arbeitsbedingter Verletzungen des Bewegungsapparats verbunden sind, erheblich zu reduzieren. Die tatsächlichen Auswirkungen auf die potenzielle Verringerung der Prävalenz von Verletzungen müssen jedoch noch ermittelt werden (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016). Neben den gesundheitlichen Aspekten bleibt eine Vielzahl an offenen Forschungsfragen beispielsweise im Hinblick auf geeignete Arbeitsprozesse oder sicherheitsrelevante Anforderungen. Ein Problem bei der Konstruktion stellt zudem die Begrenzung des Diskomfort dar. (Bosch, van Eck, Knitel, & de Looze, 2016). Die Herausforderung wird demzufolge sein, Studien mit ausgereifteren Designs sowie einem hohen Bezug zu relevanten beruflichen Tätigkeiten durchzuführen. Grundsätzlich bleibt anzunehmen, dass die Thematik in den kommenden Jahren ein fester Bestandteil arbeitsphysiologischer, -wissenschaftlicher und -medizinischer Forschung sein wird (Steinhilber, Seibt, & Luger, 2018). Eine erste Bilanzierung erfolgt derzeit durch die Erarbeitung der Arbeitsmedizinische Leitlinie „Exoskelette“. Diese wird für die Betriebe neben den Empfehlungen der Unfallversicherungsträger Informationen zum Einsatz von Exoskeletten enthalten.

6. Literatur

- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics* 54, S. 212-217.
- Constantinescu, C., Muresan, C., & Simon, G.-M. (2016). JackEx: The New Digital Manufacturing Resource for Optimization of Exoskeleton-based Factory Environments. *Procedia CIRP*, S. 508-511.
- Daub, U., Blab, F., Gawlick, S., & Tröster, M. (2018). Exoskelett - Quo Vadis? 64. *Frühjahrskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. Frankfurt a. M.
- De Looze, M., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59(5), S. 671-681.
- DGUV. (2018). *Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen*. Fachbereich Handel und Logistik der DGUV.
- Eisinger, D. B., Kumar, R., & Woodrow, R. (1996). Effect of lumbar orthotics on trunk muscle strength. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 75(3), S. 194-197.

- Graham, R., Agnew, M., & Stevenson, J. (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), S. 936-942.
- Hefferle, M.; Dahmen, C; Kluth, K. : Feldstudie zur subjektiven Bewertung eines Exoskelettes zur Unterstützung von Überkopftätigkeiten in der Automobilindustrie. ASU-Arbeits-Sozial- und Umweltmedizin, 10/2019 (im Druck)
- Hensel, R., & Keil, M. (2018). Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. *ZfA - Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 72(4), S. 252-263.
- Hensel, R., Keil, M., & Bawin, S. (2018). Feldstudie zur Untersuchung des Laevo-Ergoskelettes hinsichtlich Usability, Diskomfort und Nutzungsintention. *Tagungsband 64. Frühjahrskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. Frankfurt a. M.: GfA-Press.
- Hölzel, C., Knott, V., Schmidtler, J., & Bengler, K. (2014). Unterstützung des Menschen in der Arbeitswelt der Zukunft. In R. Weidner, & T. Redlich, *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen (Band zur ersten transdisziplinären Konferenz 2014)* (S. 359-369). Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg.
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K. S., Graf, E., & O'Sullivan, W. L. (2018). Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics* 70, S. 148-155.
- Kuhn, D., & Freyberg-Hanl, B. (2018). Exoskelett: Therapiesystem oder Hilfsmittel zum Behinderungsangleich. *Trauma und Berufskrankheit* 20(4), S. 254-259.
- Kupfernagel, J., Boblan, I., & Haibel, A. (2018). Arbeitsunterstützende Exoskelette: Anforderungen und Umsetzung in den Pionierphasen. In R. Weidner, & A. Karafilidis, *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen (Band zur dritten transdisziplinären Konferenz 2018)* (S. 417-424). Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität Hamburg.
- Lee, H., Kim, W., Han, J., & Han, C. (2012). The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 13(8), S. 1491-1497.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. *DGUV Forum* 1-2, 2018, S. 8-11.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in Arbeitssystemen: Stand der Technik - Entwicklungen - Erfahrungen. *135. Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium*, (S. 32). Wuppertal-Vohwinkel.
- Schwarz, O., & Schneider, U. (13. Juni 2019). *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA*. Von: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Biomechatronische-Systeme/Kompetenz_Bereich_Exoskelett_fuer_koerperliche_Entlastung.pdf abgerufen
- Steinhilber, B., Seibt, R., & Luger, T. (2018). Einsatz von Exoskeletten im beruflichen Kontext – Wirkung und Nebenwirkung. *ASU- Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin* 53, S. 662-664.
- Technology, A. (13. Juni 2019). Von Verdict Media Limited: <https://www.army-technology.com/projects/human-universal-load-carrier-hulc/> abgerufen

Danksagung: Ein ganz besonderer Dank gilt Frau Christin Musick für die intensive Literaturlauswertung.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

ERKENNEN.LERNEN.VERÄNDERN

Die Arbeit des Menschen in der digital vernetzten Welt

Herbstkonferenz der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

MTM ASSOCIATION e. V.

12. und 13. September 2019

GfA-Press

**Dokumentation der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
vom 12. bis 13. September 2019, Böblingen**

Deutsche MTM ASSOCIATION e. V., Hamburg

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2019
ISBN 978-3-936804-26-3

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Konferenzband

Als Manuskript zusammengestellt. Dieser Konferenzband ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de