

publiziert bei:	 AWMF online Das Portal der wissenschaftlichen Medizin
-----------------	---

AWMF-Register Nr.	002/046	Klasse:	S2k
--------------------------	----------------	----------------	------------

Einsatz von Exoskeletten im beruflichen Kontext zur Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von arbeitsassoziierten muskuloskelettalen Beschwerden

S2k-Leitlinie

der

Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.

und

Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Deutsche Gesellschaft für Neurologie e.V.

Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie e.V.

Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie e.V.

Deutsche Gesellschaft für Sozialmedizin und Prävention e.V.

Deutsche Schmerzgesellschaft e.V.

Version: 1

Federführende Fachgesellschaft:

Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.

Schwanthaler Straße 73 b

80336 München

Tel.: +49 (0) 89 / 330 396-0

Fax: +49 (0) 89 / 330 396-13

E-Mail: gs@dgaum.de

Web: www.dgaum.de

Bitte wie folgt zitieren:

Autoren:

Benjamin Steinhilber, Tessy Luger, Peter Schwenkreis, Stefan Middeldorf, Hartmut Bork, Bernhard Mann, Alexander von Glinski, Thomas A. Schildhauer, Stephan Weiler, Martin Schmauder, Kai Heinrich, Gabriele Winter, Gerhard Schnalke, Peter Frener, Ralf Schick, Sascha Wischniewski, Matthias Jäger

Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.

Einsatz von Exoskeletten im beruflichen Kontext zur Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von arbeitsassoziierten muskuloskelettalen Beschwerden

1. AUFLAGE, VERSION 1 VOM 31.05.2020

VERFÜGBAR UNTER: [HTTPS://WWW.AWMF.ORG/LEITLINIEN/DETAIL/LL/002-046.HTML](https://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/002-046.html)

DGAUM
DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR
ARBEITSMEDIZIN UND UMWELTMEDIZIN



DGN
Deutsche Gesellschaft
für Neurologie

DGOJ
DEUTSCHE GESELLSCHAFT
FÜR ORTHOPÄDIE UND
ORTHOPÄDISCHE CHIRURGIE

DGOJ
Deutsche Gesellschaft für
Orthopädie und Unfallchirurgie



**DEUTSCHE GESELLSCHAFT
FÜR SOZIALMEDIZIN
UND PRÄVENTION**

Deutsche Schmerzgesellschaft e.V.
Sektion der International Association for the Study of Pain (IASP)

Die wichtigsten Empfehlungen auf einen Blick

Im Folgenden werden die wichtigsten Kernaussagen und Empfehlungen dieser Leitlinie aufgelistet.

Kernaussagen

1	Kernaussage	Stand (2020)
Die Maßnahmenhierarchie des Arbeitsschutzes muss beim Einsatz von Exoskeletten eingehalten werden.		
Gesetzliche Regelung: Maßnahmen des Arbeitsschutzes folgen dem S-T-O-P-Prinzip. Dabei sind nach ArbSchGs § 4 Gesundheitsgefahren an ihrer Quelle zu bekämpfen und individuelle Schutzmaßnahmen nachrangig zu anderen Maßnahmen zu ergreifen.		
Konsensstärke: starker Konsens		

2	Kernaussage	Stand (2020)
Eine präventive Wirkung von Exoskeletten auf Muskel-Skelett-Beschwerden oder sogar Muskel-Skelett-Erkrankungen kann auf Basis des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstands und der Erfahrungen aus der beruflichen Praxis nicht begründet werden, d.h. weder eine primär- noch eine sekundär- oder tertiärpräventive Wirkung.		
Begründung: Es liegen keine Längsschnittstudien vor, die zeigen, dass durch Verwendung eines Exoskeletts arbeitsassoziierte Muskel-Skelett-Beschwerden oder Muskel-Skelett-Erkrankungen verhindert werden.		
Konsensstärke: Konsens		

3	Kernaussage	Stand (2020)
Es besteht keine ausreichende Evidenz zum Einsatz von Exoskeletten bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenden Strukturen hinsichtlich einer Symptomlinderung oder Vorbeugung einer Symptomverschlimmerung.		
Begründung: Die Frage nach (sekundär und tertiär) präventiver Wirkung kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht valide beantwortet werden. Aus den vorliegenden Probandenstudien können diesbezüglich keine Aussagen abgeleitet werden. Es gibt aus Studien an gesunden Probanden Anhaltspunkte, dass höhere bzw. neue relevante Belastungen an anderen Körperregionen auftreten können.		
Konsensstärke: starker Konsens		

Empfehlungen

10	Empfehlung	Stand (2020)
	<p>A. Für Arbeitsplätze, an denen Exoskelette eingesetzt werden, soll eine spezifische Gefährdungsbeurteilung mit Bezug zum verwendeten Exoskelett durchgeführt werden.</p> <p>B. Dafür sollte die Arbeitshilfe zur Gefährdungsbeurteilung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung verwendet werden</p> <p>https://www.dguv.de/medien/ifa/de/prg/ergonomie/gefaehrdungsbeurteilung_exoskelette.pdf</p>	
	<p>Begründung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckstellen und Beschwerden an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen treten häufig auf (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Kim <i>et al.</i> 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019). - Abhängig von der Tätigkeit und dem Exoskelettmodell können muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchung in anderen Körperregionen zunehmen (Huysamen <i>et al.</i> 2018). - Das Sturzrisiko kann durch ein Exoskelett für die untere Extremität zunehmen (Luger <i>et al.</i> 2019b) 	
	Konsensstärke: starker Konsens	

11	Empfehlung	Stand (2020)
	<p>So lange ein gesundheitlicher Vorteil durch die Verwendung von Exoskeletten bei beruflichen Tätigkeiten nicht durch wissenschaftliche Evidenz gesichert ist, soll die Nutzung eines Exoskeletts für die Beschäftigten freiwillig sein.</p>	
	<p>Begründung</p> <p>Ohne einen gesicherten wissenschaftliche Nachweis zur präventiven Wirkung von Exoskeletten auf Muskel-Skelett-Beschwerden oder -Erkrankungen wäre es unangemessen Beschäftigte zur Exoskelettverwendung zu verpflichten, insbesondere da im Moment mögliche negative Auswirkungen durch Exoskelette, ebenso wie vermeintlich positive Wirkungen, nicht ausgeschlossen werden können (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Luger <i>et al.</i> 2019b).</p>	
	Konsensstärke: starker Konsens	

12	Empfehlung	Stand (2020)
	<p>A. Die Anwendung von Exoskeletten soll medizinisch-technisch durch Praktiker des Arbeitsschutzes, insbesondere den betriebsbetreuenden Arzt, überwacht werden.</p> <p>B. Dabei sollten Beschäftigte regelmäßig befragt sowie eine regelmäßige körperliche Untersuchung durch den betriebsbetreuenden Arzt angeboten werden.</p>	
	<p>Begründung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckstellen und Beschwerden an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen treten häufig auf (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Kim <i>et al.</i> 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019, Luger <i>et al.</i> 2019b). - Abhängig von der Tätigkeit und dem Exoskelettmodell können muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchungen in anderen Körperregionen zunehmen (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Luger <i>et al.</i> 2019b). - In den Gelenken der oberen Extremität kann es zu Bewegungseinschränkungen durch Exoskelette kommen (Kim <i>et al.</i> 2018b). 	
	Konsensstärke: starker Konsens	

<u>DIE WICHTIGSTEN EMPFEHLUNGEN AUF EINEN BLICK</u>	<u>2</u>
<u>1. GELTUNGSBEREICH UND ZWECK</u>	<u>7</u>
1.1 BEGRÜNDUNG FÜR DIE AUSWAHL DES LEITLINIENTHEMAS	7
1.2 ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	7
1.3 VERSORGUNGSBEREICH	7
1.4 ZIELGRUPPE	7
1.5 ADRESSATEN	7
1.6 WEITERE DOKUMENTE ZU DIESER LEITLINIE	8
<u>2. EINLEITUNG</u>	<u>9</u>
<u>3. EXOSKELETTE ZUR UNTERSTÜTZUNG BERUFLICHER TÄTIGKEITEN IM KONTEXT DES ARBEITSSCHUTZES</u>	<u>10</u>
3.1 AUFGABEN DES ARBEITSSCHUTZES IN DEUTSCHLAND	10
3.2 EXOSKELETTE ALS ARBEITSSCHUTZMAßNAHME	10
<u>4. ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN ZUR NUTZUNG VON EXOSKELETTEN</u>	<u>13</u>
4.1 KERNAUSSAGEN	13
4.2 ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN ZUR NUTZUNG VON EXOSKELETTEN	14
4.3 EMPFEHLUNGEN ZUR IMPLEMENTIERUNG VON EXOSKELETTEN	15
4.4 EMPFEHLUNGEN ZUR NUTZUNG VON EXOSKELETTEN BEI BESONDEREN ARBEITSUMGEBUNGEN/UMWELTBEDINGUNGEN	15
<u>5. KRITERIEN FÜR DIE GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG VON EXOSKELETTUNTERSTÜTZTEN BERUFLICHEN TÄTIGKEITEN</u>	<u>17</u>
<u>6. PRIMÄRPRÄVENTION VON MUSKEL-SKELETT-BESCHWERDEN DURCH DIE VERWENDUNG VON EXOSKELETTEN – AUSSAGEN BESCHRÄNKT AUF BELASTUNG ODER BEANSPRUCHUNG</u>	<u>18</u>

6.1 EXOSKELETTE ZUR UNTERSTÜTZUNG DER OBEREN EXTREMITÄTEN (EINSCHL. SCHULTER, KOPF/HALS/NACKEN)	19
6.2 EXOSKELETTE ZUR UNTERSTÜTZUNG DES RUMPfes EINSCHL. DER WIRBELSÄULE	20
6.3 EXOSKELETTE ZUR UNTERSTÜTZUNG DER UNTEREN EXTREMITÄTEN EINSCHL. HÜFTE UND BECKEN	23
6.4 EMPFEHLUNG FÜR DIE PRIMÄRPRÄVENTION VON MSB	25
<u>7. SEKUNDÄR- UND TERTIÄRPRÄVENTION VON MUSKEL-SKELETT-BESCHWERDEN DURCH DIE VERWENDUNG VON EXOSKELETEN – AUSSAGEN ABGELEITET AUS BEFUNDEN AN GESUNDEN</u>	<u>26</u>
7.1 MÖGLICHE ENTLASTUNG DER GESCHÄDIGTEN KÖRPERSTRUKTUR DURCH EIN EXOSKELETT	26
7.2 KONTRAINDIKATIONEN FÜR DEN EINSATZ EINES EXOSKELETTS IM RAHMEN DER SEKUNDÄR- UND TERTIÄRPRÄVENTION	27
7.3 EINSATZDAUER VON EXOSKELETEN IN DER SEKUNDÄR- UND TERTIÄRPRÄVENTION	28
7.4 EMPFEHLUNG FÜR DIE SEKUNDÄRPRÄVENTION BEI MSB	28
7.5 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE TERTIÄRPRÄVENTION BEI MSE	30
<u>8. SONSTIGE WIRKUNGEN VON EXOSKELETEN</u>	<u>32</u>
<u>9. WICHTIGE FORSCHUNGSFRAGEN</u>	<u>33</u>
FORSCHUNGSFELD 1: PRÄVENTION VON MUSKEL-SKELETT-BESCHWERDEN UND -ERKRANKUNGEN DURCH EXOSKELETTE	33
FORSCHUNGSFELD 2: WIRKUNG VON EXOSKELETEN AUF DAS MUSKEL-SKELETT-SYSTEM	33
FORSCHUNGSFELD 3: WIRKUNG VON EXOSKELETEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN BERUFLICHEN TÄTIGKEITEN UND EIGENSCHAFTEN DER NUTZER	33
FORSCHUNGSFELD 4: FRAGEN DER ARBEITSSICHERHEIT	34
FORSCHUNGSFELD 5: SOZIALWISSENSCHAFTLICHE ASPEKTE BEI DER VERWENDUNG VON EXOSKELETEN	34
<u>10. INFORMATIONEN ZU DIESER LEITLINIE</u>	<u>36</u>
10.1 ZUSAMMENSETZUNG DER LEITLINIENGRUPPE	36
10.1.1 LEITLINIENKOORDINATORIN/ANSPRECHPARTNERIN	36
10.1.2 BETEILIGTE FACHGESELLSCHAFTEN UND ORGANISATIONEN	36

10.1.3 ADRESSATEN-/PATIENTENBETEILIGUNG	37
10.1.4 METHODISCHE BEGLEITUNG	37
10.2 METHODISCHE GRUNDLAGEN	37
10.3 LITERATURRECHERCHE UND KRITISCHE BEWERTUNG	38
10.4 STRUKTURIERTE KONSENSFINDUNG	38
10.5 EMPFEHLUNGSGRADUIERUNG UND FESTSTELLUNG DER KONSENSSTÄRKE	38
10.5.1 FESTLEGUNG DES EMPFEHLUNGSGRADES	38
10.5.2 FESTSTELLUNG DER KONSENSSTÄRKE	39
<u>11. REDAKTIONELLE UNABHÄNGIGKEIT</u>	<u>40</u>
11.1 FINANZIERUNG DER LEITLINIE	40
11.2 DARLEGUNG VON INTERESSEN UND UMGANG MIT INTERESSENKONFLIKTEN	40
<u>12. EXTERNE BEGUTACHTUNG UND VERABSCHIEDUNG</u>	<u>40</u>
<u>13. VERWENDETE ABKÜRZUNGEN</u>	<u>42</u>
<u>14. LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>43</u>

1. Geltungsbereich und Zweck

1.1 Begründung für die Auswahl des Leitlinienthemas

Die Prävention arbeitsassoziierter Muskel-Skelett-Beschwerden (MSB) und Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) hat vor dem Hintergrund der Prävalenz von MSB und MSE und der damit verbundenen hohen Belastung der Gesundheitssysteme, Wirtschaft und der Betroffenen selbst einen hohen Stellenwert. Ob die Verwendung von Exoskeletten zur Prävention von MSB oder gar MSE beiträgt, wird aktuell kontrovers diskutiert.

1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Die vorliegende Leitlinie thematisiert Einsatzmöglichkeiten von Exoskeletten in der betrieblichen Anwendung zur Prävention von Muskel-Skelett-Beschwerden (MSB). Dabei werden die Bereiche Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von MSB differenziert sowie auch allgemeine Empfehlungen zur Nutzung, Implementierung von Exoskeletten und zur Gefährdungsbeurteilung gegeben.

1.3 Versorgungsbereich

Der Versorgungsbereich ist die arbeits- und betriebsmedizinische Beratung und Vorsorge sowie die ergonomische Arbeitsgestaltung zum Erhalt der Arbeitsfähigkeit, die Vermeidung von Manifestation und Verschlimmerung arbeitsbedingter Muskel-Skelett-Erkrankungen und -Beschwerden sowie die berufliche Wiedereingliederung.

1.4 Zielgruppe

Gesunde Beschäftigte, deren Muskel-Skelett-System vor Beschwerden und Erkrankungen geschützt werden soll (Primärprävention). Beschäftigte mit MSB oder MSE, die vor einer Verschlimmerung bzw. Manifestierung einer Erkrankung bewahrt werden sollen bzw. die eine Teilhabe an beruflichen Tätigkeiten wiedererlangen sollen.

1.5 Adressaten

Die Leitlinie richtet sich an Betriebsärztinnen und Betriebsärzte, Arbeitsmedizinerinnen und Arbeitsmediziner, Ergonominnen und Ergonomen, Fachkräfte für Arbeitssicherheit, Arbeitgeberinnen und Arbeitgeber sowie alle weiteren Akteurinnen und Akteure des praktischen Arbeitsschutzes.

Adressaten, die nicht direkt an der Leitlinienerstellung beteiligt waren:

Arbeitgeber/innen und Beschäftigte waren nicht direkt an der Leitlinienerstellung beteiligt, da diese Assistenzsysteme zum Zeitpunkt der Leitlinienerstellung noch kaum im Routineeinsatz waren.

1.6 Weitere Dokumente zu dieser Leitlinie

- Leitlinienreport

[HTTPS://WWW.AWMF.ORG/LEITLINIEN/DETAIL/LL/002-046.HTML](https://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/002-046.html)

2. Einleitung

Muskel-Skelett-Beschwerden (MSB) und Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) stellen ein bedeutendes gesellschaftliches Problem dar mit einer hohen Belastung für die Gesundheitssysteme, die Wirtschaft und die Betroffenen selbst (Burton and Kendall 2014, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2017, Grobe *et al.* 2018). Es wird angenommen, dass arbeitsbedingte Risikofaktoren wie z.B. hohe und häufige Kraftaufwendungen, repetitive Tätigkeiten, statische Muskelbeanspruchungen und andere einen kausalen Beitrag an der Entstehung von MSB und MSE haben (da Costa and Vieira 2010). Einige Autoren betrachten diesen Zusammenhang als Chance bzw. Potential für die Prävention (Epstein *et al.* 2018) u.a. durch eine ergonomische Arbeitsgestaltung und Arbeitssicherheitsmaßnahmen (Jezukaitis and Kapur 2011).

Technische Entwicklungen haben die Arbeitswelt schon immer geprägt. Teilweise führte dies sogar zum Verschwinden ganzer Berufszweige bzw. zu Verschiebungen auf andere berufliche Sektoren. Auch auf Ebene der Arbeitsbedingungen kommt es zu Veränderungen durch technische Entwicklungen (Eichenhorst and Buhlmann 2015). Im Idealfall werden arbeitsbedingte Risikofaktoren reduziert und ein Beitrag zur Prävention von MSB / MSE geleistet. Seit einiger Zeit werden Exoskelette als Präventionsmaßnahme von arbeitsbedingten MSB / MSE diskutiert, da sie das Potential haben, arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Belastungen zu reduzieren. Das wesentliche Funktionsprinzip dieser direkt am Körper getragenen Assistenzsysteme ist es, mechanische Energie auf den menschlichen Körper zu transferieren und dadurch an definierten Körperpartien physische Belastungen zu reduzieren (Huysamen *et al.* 2018).

Im Rahmen einer standardisierten Literaturrecherche sowie einer Befragung von 9 Exoskelettherstellerinnen und -herstellern sowie 19 Unternehmen, die Exoskelette zum Zeitpunkt der Befragung erprobten, wurden Kernaussagen und Empfehlungen abgeleitet, die sich auf Einsatzmöglichkeiten von Exoskeletten in der betrieblichen Anwendung zur Prävention von MSB konzentrieren. Dabei wird der aktuelle Stellenwert von Exoskeletten im Rahmen der betrieblichen Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention aufgezeigt und Hinweise zur allgemeinen Anwendung und Implementierung gegeben. Für alle Empfehlungen gilt es, den Kontext der Maßnahmenhierarchie des praktischen Arbeitsschutzes zu berücksichtigen.

3. Exoskelette zur Unterstützung beruflicher Tätigkeiten im Kontext des Arbeitsschutzes

3.1 Aufgaben des Arbeitsschutzes in Deutschland

Grundsätzlich sind Arbeitsplätze und die Arbeitsbedingungen nach den Prinzipien des Arbeitsschutzes zu gestalten. Sofern Gesundheitsrisiken nicht komplett verhindert werden können, sollen weitere Maßnahmen nach dem S-T-O-P-Prinzip angewendet werden. Maßnahmen auf persönlicher Ebene stehen dabei in der Hierarchie an letzter Stelle, sollten also erst dann ergriffen werden, wenn andere Möglichkeiten ausgeschöpft sind oder ausgeschlossen werden müssen. Dieses Prinzip des praktischen Arbeitsschutzes operationalisiert allgemeine Grundsätze des Arbeitsschutzgesetzes §4. Die Abkürzung S-T-O-P steht für Substitution, technische, organisatorische und personengebundene Maßnahmen und legt die Hierarchie der Schutzmaßnahmen fest (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2020). Substitution meint die Vermeidung von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und kann beispielsweise erreicht werden, indem zu manipulierende Lasten grundsätzlich verringert werden. Technische Maßnahmen umfassen zum Beispiel die Verwendung einer Hebehilfe, um Lasten zu bewegen. Zu organisatorischen Maßnahmen zählen beispielsweise Arbeitsplatzwechsel (Rotation), so dass die Dauer und Häufigkeit von Tätigkeiten mit erhöhten Belastungen für den einzelnen Beschäftigten reduziert werden. Schließlich sind personenbezogene und personengebundene Maßnahmen etwa die Nutzung einer persönlichen Schutzausrüstung (z.B. Tragen von Sicherheitsschuhen) oder auch das Angebot einer Rückenschule, in der Beschäftigte lernen, Lasten rückschonend zu heben und zu tragen.

3.2 Exoskelette als Arbeitsschutzmaßnahme

Exoskelette sind am Körper getragene Assistenzsysteme, die mechanisch auf den Körper einwirken (Schick 2018). Ein für die Anwendung an gewerblichen Arbeitsplätzen interessanter Ansatz ist die Kombination aus menschlicher Intelligenz und Kraft einer Maschine. Somit soll das Exoskelett ermöglichen, die Kreativität und Flexibilität des Menschen zu erhalten, ohne dass dies einem Roboter beigebracht bzw. programmiert werden muss (de Looze *et al.* 2016). Hersteller/innen und Entwickler/innen von Exoskeletten für gewerbliche Arbeitsplätze sehen in diesen Assistenzsystemen die Möglichkeit, die Arbeitsbedingungen zu verbessern, indem arbeitsbedingte physische Belastungen verringert werden. Auch Firmen hoffen darauf, dass Exoskelette einen Präventionsansatz gegen MSB und MSE darstellen werden (Fischer 2018).

Definition – Exoskelette:

Die folgende Definition wurde innerhalb der Leitliniengruppe verabschiedet und orientiert sich an der Definition nach (Schick 2018).

Exoskelette sind am Körper getragene Assistenzsysteme, die mechanisch auf den Körper einwirken. Im beruflichen Kontext zielen Sie darauf ab, Funktionen des Skelett- und Bewegungssystems bei körperlicher Arbeit zu unterstützen.

Exoskelette können nach der Art der Energiebereitstellung, der unterstützten Körperregion sowie nach dem Grad der Passung an die menschliche Anthropometrie unterschieden werden (de Looze *et al.* 2016). Demnach bezeichnet man ein Exoskelett als „aktiv“, wenn es über einen oder mehrere mechanische Antriebselemente, Pneumatik- oder Hydraulikzylinder verfügt, die die Leistungsfähigkeit eines Gelenksystems des Nutzers steigern. Passive Exoskelette hingegen kennzeichnen sich durch die Verwendung von Materialien, die in der Lage sind, die während einer Bewegung aufgenommene und gespeicherte Energie zur Stabilisierung oder Bewegungsunterstützung an den Nutzer zurückzugeben (de Looze *et al.* 2016). Zum derzeitigen Stand der Technik sind es überwiegend passive Exoskelette, die für eine Anwendung im betrieblichen Setting eingesetzt werden können. Aktive Systeme sind häufig noch zu schwer und bezüglich der Systemregelung für eine zeit- und intensitätsangemessene Unterstützung nicht ausgereift. Es ist jedoch mit schnellen Entwicklungsfortschritten im Verlauf der kommenden Jahre zu rechnen.

Bei der Unterscheidung nach der unterstützten Körperregionen zeichnen sich folgende Kategorien ab: Gesamtkörper, obere Extremität, untere Extremität, Rücken/Rumpf. Teilweise wird jedoch auch hinsichtlich der zu unterstützenden beruflichen Tätigkeit unterschieden (Marinov 2019).

Bei einer Klassifizierung in den Grad der Übereinstimmung zur Anthropometrie der Exoskelettnutzerinnen und -nutzer zeichnet sich ein anthropometrisches Exoskelett durch hohe anthropomorphe Übereinstimmung des Exoskeletts und den Nutzerinnen und Nutzern aus. Dabei werden Exoskelette mit Rotationsachsen eingesetzt, um die Rotationsbewegungen der menschlichen Gelenke bestmöglich abzubilden. Nicht-anthropometrische Exoskelette sind simpler aufgebaut und können in einer spezifischen Art gestaltet sein, dass sie für bestimmte (berufliche) Situationen einen effektiveren Energieaufwand als anthropomorphe Systeme erlauben (de Looze *et al.* 2016).

Obwohl bislang nur wenig Erfahrungen und wissenschaftliche Studien mit Exoskeletten für betriebliche Anwendungen vorliegen, zeigen die aktuell verfügbaren Systeme bereits sehr vielfältige technische und funktionelle Ausgestaltungen. Somit könnten Exoskelette in Zukunft für ein breites Feld an beruflichen Tätigkeiten und verschiedene Gruppen von Beschäftigten eingesetzt werden. Aktuell bezieht sich der Einsatz von Exoskeletten überwiegend auf die Unterstützung von Heben und

Tragen, Überschulter- und Überkopfarbeit, Arbeit in statischen Körperhaltungen (Steharbeit, Arbeit in vorgebeugter Körperhaltung) und Lastenhandhabung. Wie bereits erwähnt, wird in Exoskeletten das Potential zur Prävention von MSB und MSE gesehen. Dieses bezieht sich einerseits auf die Primärprävention, also das Verhindern des Auftretens von MSB und MSE, andererseits auch auf Potentiale in der beruflichen Sekundär- und Tertiärprävention. Eine symptomlindernde Wirkung durch Exoskelette könnte Beschäftigte mit bestehenden MSB die beruflichen Aufgaben erleichtern bzw. eine weitere Verschlechterung im Sinne der Manifestierung einer MSE verhindern oder Beschäftigte mit chronischen MSE im Rahmen des betrieblichen Eingliederungsmanagements eine weitere Teilhabe am Arbeitsleben ermöglichen. Zudem wird diskutiert, ob Exoskelette auch im Rahmen der Inklusion genutzt werden könnten, indem sie einen Beitrag zur Integration von Menschen mit Behinderungen in Arbeits- und Produktionsprozesse leisten (Schick 2018).

Die von Herstellerinnen und Herstellern sowie von Firmen beschriebenen Präventionspotentiale und Einsatzmöglichkeiten legen eine Einordnung von Exoskeletten im Rahmen der S-T-O-P-Hierarchie als personenbezogene und personengebundene Maßnahme nahe. Derartige Arbeitsschutzmaßnahmen stehen – wie eingangs ausgeführt – in der Hierarchie der Arbeitsschutzmaßnahmen grundsätzlich an letzter Stelle und sollten erst dann in Betracht gezogen werden, wenn andere Möglichkeiten ausgeschöpft bzw. nicht realisierbar sind. Letztlich entscheidet der Verwendungszweck des Exoskeletts maßgeblich, welchen sicherheitstechnischen Anforderungen ein Exoskelett zu erfüllen hat und an welcher Stelle es in der Arbeitsschutzhierarchie zu berücksichtigen ist. Sollte ein Exoskelett beispielsweise als medizinisches Hilfsmittel bei der beruflichen Wiedereingliederung eingesetzt werden, muss es auch den sicherheitstechnischen Anforderungen eines Medizinproduktes entsprechen (Schick 2018). Die aktuell unklaren Befunde zur Wirksamkeit von Exoskeletten sowie zu etwaigen negativen Auswirkungen erschweren eine klare Einordnung und sind zum jetzigen Zeitpunkt ein starkes Argument gegen die Einstufung von Exoskeletten als persönliche Schutzausrüstung.

4. Allgemeine Empfehlungen zur Nutzung von Exoskeletten

Wissenschaftliche Studien und Berichte aus der Praxis deuten darauf hin, dass Exoskelette aktuell überwiegend zur Unterstützung von Heben und Tragen, Überschulter- und Überkopfarbeit, Arbeit in statischen Körperhaltungen (Steharbeit, Arbeit in vorgebeugter Körperhaltung) und Lastenhandhabung genutzt werden. Prinzipiell kommt die Anwendung von Exoskeletten jedoch für vielfältige berufliche Tätigkeiten in Frage. Entscheidend für einen sinnvollen Einsatz ist das Zusammenspiel aus den spezifischen Exoskeletteigenschaften, den Anforderungen der beruflichen Tätigkeit und den spezifischen Eigenschaften der Nutzerinnen und Nutzer.

Die folgenden allgemeinen Empfehlungen beziehen sich auf die Einführung in die betriebliche Praxis sowie auf günstige bzw. ungünstige Umgebungsbedingungen bei der Exoskelettanwendung. Sie basieren auf Expertenwissen, Erfahrungen aus der Praxis¹ und wissenschaftlichen Studien mit überwiegendem Bezug zu passiven Exoskeletten. Aktive Systeme sind derzeit kaum für die Praxis verfügbar und es gibt kaum wissenschaftliche Studien zur Wirkung im Sinne einer physischen Entlastung, Änderung des Bewegungsverhaltens, Anstrengungsverringerung und Gebrauchstauglichkeit bei realen beruflichen Tätigkeiten.

Wichtige Hinweise zur Nutzung von Exoskeletten können auch von den Exoskelettherstellerinnen und -herstellern kommen. Entsprechende Informationen in den jeweiligen Betriebsanweisungen – z.B. welche Umweltfaktoren, die Funktion des Exoskeletts stören, welche Wartung und Pflege notwendig ist oder welche Tätigkeiten bzw. Bewegungen mit dem Exoskelett zu vermeiden sind – wären wünschenswert.

4. 1 Kernaussagen

1	Kernaussage	Stand (2020)
Die Maßnahmenhierarchie des Arbeitsschutzes muss beim Einsatz von Exoskeletten eingehalten werden.		
Gesetzliche Regelung: Maßnahmen des Arbeitsschutzes folgen dem S-T-O-P-Prinzip. Dabei sind nach ArbSchGs § 4 Gesundheitsgefahren an ihrer Quelle zu bekämpfen und individuelle Schutzmaßnahmen nachrangig zu anderen Maßnahmen zu ergreifen.		
Konsensstärke: starker Konsens		

¹ Im Rahmen der Erstellung dieser Leitlinie machten sieben Unternehmen, die bereits Exoskelette erproben, und ein Exoskeletthersteller Angaben zur allgemeinen Exoskelettnutzung, dem Vorgehen bei der Einführung und der Nutzung bei verschiedenen Umweltbedingungen. Insgesamt wurden 19 Unternehmen und neun Exoskeletthersteller und -herstellerinnen um entsprechende Angaben gebeten.

4.2 Allgemeine Empfehlungen zur Nutzung von Exoskeletten

1	Empfehlung	Stand (2020)
	Der Arbeitgeber soll die Funktionalität, den Nutzen sowie die Passung des Exoskeletts für sämtliche Arbeitsaufgaben und die dafür erforderlichen Bewegungsabläufe gewährleisten.	
	Begründung: Studien zeigen, dass eine potentielle Belastungsminderung in Körperstrukturen durch Verwendung eines Exoskeletts von der Tätigkeit und dem Exoskelettmodell abhängt (Kim <i>et al.</i> 2018a, Theurel <i>et al.</i> 2018, Alabdulkarim and Nussbaum 2019).	
	Konsensstärke: starker Konsens	

2	Empfehlung	Stand (2020)
	Beim Einsatz eines Exoskeletts soll die Betriebsanleitung des Herstellers eingehalten werden.	
	Begründung: Nach dem Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz - ProdSG) müssen die Hersteller zu ihren Produkten alle relevanten Angaben bereitstellen, die für die bestimmungsgemäße und sichere Verwendung eines Produktes notwendig sind. In Bezug auf die körperlichen Voraussetzungen kann dies beispielsweise die zulässigen anthropometrischen Daten der Nutzer von Exoskeletten beinhalten.	
	Konsensstärke: starker Konsens	

3	Empfehlung	Stand (2020)
	Es soll eine ausreichende körperliche Belastbarkeit und ausreichende kognitive Fähigkeiten für die Nutzung des vorgesehenen Exoskeletts vorhanden sein.	
	Begründung: Viele Exoskelettmodelle weisen im Moment noch ein nicht unwesentliches Eigengewicht, im Einzelfall bis zu 8 kg auf. Ungeachtet einer möglichen Unterstützung durch das Exoskeletts bedarf es daher einer ausreichenden körperlichen Belastbarkeit der Beschäftigten, diese Zusatzlast durch das Exoskelett-Eigengewicht über die beabsichtigte Nutzungsdauer ohne negative Beanspruchungsreaktionen zu tolerieren. Ebenso können Exoskelette nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn Beschäftigte kognitiv in der Lage sind, die Funktionsweise zu verstehen und das Exoskelett sachgemäß zu verwenden.	
	Konsensstärke: starker Konsens	

4	Empfehlung	Stand (2020)
	Der Arbeitgeber soll bei der Auswahl eines Exoskeletts sicherstellen, dass sich dieses auf die Körpermaße des Beschäftigten anpassen lässt.	
	Begründung: Aktuell verfügbare Exoskelette berücksichtigen nicht alle Körpergrößen und anthropometrischen Voraussetzungen. In einer Studie wird darauf hingewiesen, dass 3 von 23 Probanden von der Studie ausgeschlossen werden mussten, da das Exoskelett sich nicht für ihre Körpergröße eignete und mit dem Bewegungsverhalten dieser Personen nicht kompatibel war (Liu <i>et al.</i> 2018).	
	Konsensstärke: starker Konsens	

4.3 Empfehlungen zur Implementierung von Exoskeletten

5	Empfehlung	Stand (2020)
Die Implementierung von Exoskeletten im Betrieb soll unter Einbezug aller Praktiker des Arbeitsschutzes, insbesondere des betriebsbetreuenden Arztes, sowie den Beschäftigten selbst erfolgen.		
Begründung: Die Auswirkungen des Einsatzes von Exoskeletten betreffen nicht nur den Nutzer selbst, sondern auch die Kollegen und Vorgesetzten. Eine umfassende Analyse aller Effekte und entsprechende Maßnahmen fördern die Akzeptanz und helfen, Fehlentwicklungen vorzubeugen.		
Konsensstärke: starker Konsens		

6	Empfehlung	Stand (2020)
Die Einführung und Nutzung des Exoskeletts soll mit einer Schulung verbunden sein.		
Begründung: Die Nutzung – insbesondere das Anlegen und das Einstellen von Exoskeletten – ist nicht intuitiv. Firmen, die Exoskelette erprobt haben, empfehlen eine Schulung bei der Einführung von Exoskeletten. Bei einigen Herstellern ist die Herstellereinweisung im Kaufpreis eines Exoskeletts enthalten.		
Konsensstärke: starker Konsens		

7	Empfehlung	Stand (2020)
Den Beschäftigten soll eine Eingewöhnung an das Exoskelett ermöglicht werden.		
Begründung: Studien zeigen die Notwendigkeit einer Eingewöhnung an die Durchführung beruflicher Tätigkeiten mit Exoskeletten. Ohne eine Eingewöhnung werden die Studienergebnisse als weniger verlässlich erachtet (Kim <i>et al.</i> 2018a, Luger <i>et al.</i> 2019a). Auch Firmen, die Exoskelette erprobt haben, empfehlen ein langsames Heranführen an die Tätigkeit mit Exoskelett, um die Akzeptanz durch die Beschäftigten zu erhöhen.		
Konsensstärke: starker Konsens		

4.4 Empfehlungen zur Nutzung von Exoskeletten bei besonderen Arbeitsumgebungen/Umweltbedingungen

8	Empfehlung	Stand (2020)
Exoskelette sollten bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 30°C nur zeitlich begrenzt zum Einsatz kommen.		
Begründung: Bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit kommt es zu starker Schweißbildung an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen, was sich in gesteigertem Diskomfort, Hygieneeinschränkungen bis hin zu erhöhter Rutschgefahr äußern kann. Diese Einschränkungen wurden im Rahmen einer		

Allgemeine Empfehlungen zur Nutzung von Exoskeletten

Umfrage von Unternehmen, die bereits Exoskelette erproben, von mindestens einem Unternehmen genannt.

Konsensstärke: starker Konsens

9	Empfehlung	Stand (2020)
	Bevor ein Exoskelett eingesetzt wird, soll die Arbeitsumgebung hinsichtlich Stolper-, Rutsch- und Sturzgefahren geprüft und bei Bedarf angepasst werden.	
	Begründung: Stürze mit Exoskelett können die Verletzungsschwere bei Stürzen erhöhen, da der Betroffene sich nicht wie gewohnt abfangen und auf Bauteile des Exoskeletts fallen kann.	
	Konsensstärke: starker Konsens	

5. Kriterien für die Gefährdungsbeurteilung von exoskelettunterstützten beruflichen Tätigkeiten

Die Gefährdungsbeurteilung gilt als das zentrale Element im Arbeitsschutz und ist Grundlage für ein systematisches und erfolgreiches Sicherheits- und Gesundheitsmanagement in Betrieben. Der genaue Umfang und die Methodik der Gefährdungsbeurteilung richten sich stets nach den konkreten betrieblichen Gegebenheiten (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2020).

Für die Gefährdungsbeurteilung von beruflichen Tätigkeiten, die durch Exoskelette unterstützt werden, sollte beachtet werden, dass ein Exoskelett nach derzeitigem Erkenntnisstand nicht dafür geeignet ist, bereits erkannte Gefährdungen an einem Arbeitsplatz zu reduzieren oder zu beseitigen, und darf daher laut der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) nicht zu diesem Zweck eingesetzt werden (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2020).

Die DGUV hat kürzlich eine Arbeitshilfe für die Gefährdungsbeurteilung für die Anwendung von Exoskeletten veröffentlicht. Damit können mögliche Gefährdungen - z.B. durch die Arbeitsumgebung oder aufgrund von Hygieneaspekten - spezifisch für das an einem Arbeitsplatz zur Anwendung kommende Exoskelett beurteilt werden. Die aktuelle Version 1. 1 gilt als Entwurf und wurde mit der Leitliniengruppe dieser Leitlinie abgestimmt. Sollten sich anhand weiterer Erfahrungen aus Praxis und Forschung Aktualisierungen ergeben, kann diese Arbeitshilfe zur Gefährdungsbeurteilung entsprechend angepasst werden. Sie ist unter folgendem Link verfügbar und wird von den Autoren dieser Leitlinie empfohlen.

10	Empfehlung	Stand (2020)
	<p>A. Für Arbeitsplätze, an denen Exoskelette eingesetzt werden, soll eine spezifische Gefährdungsbeurteilung mit Bezug zum verwendeten Exoskelett durchgeführt werden.</p> <p>B. Dafür sollte die Arbeitshilfe zur Gefährdungsbeurteilung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung verwendet werden.</p> <p><i>https://www.dguv.de/medien/ifa/de/prax/ergonomie/gefaehrungsbeurteilung_exoskelette.pdf</i></p>	
	<p>Begründung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckstellen und Beschwerden an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen treten häufig auf (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Kim <i>et al.</i> 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019). - Abhängig von der Tätigkeit und dem Exoskelettmodell können muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchung in anderen Körperregionen zunehmen (Huysamen <i>et al.</i> 2018). - Das Sturzrisiko kann durch ein Exoskelett für die untere Extremität zunehmen (Luger <i>et al.</i> 2019b). <p>Konsensstärke: starker Konsens</p>	

6. Primärprävention von Muskel-Skelett-Beschwerden durch die Verwendung von Exoskeletten – Aussagen beschränkt auf Belastung oder Beanspruchung

Präambel

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, ob Exoskelette zur Unterstützung beruflicher Tätigkeiten eine primärpräventive Wirkung auf Muskel-Skelett-Beschwerden (MSB) aufweisen. In der aktuellen wissenschaftlichen Literatur (Stand Juli 2019) finden sich keine Aussagen zum Nachweis einer primärpräventiven Wirkung von Exoskeletten auf Beschwerden oder Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems

- weder bei der Nutzung von Exoskeletten zur Unterstützung der oberen Extremitäten einschließlich Schulter, Kopf, Hals und Nacken,
- noch bei der Nutzung von Exoskeletten zur Unterstützung des Rumpfes einschließlich der Wirbelsäule,
- noch bei der Nutzung von Exoskeletten zur Unterstützung der unteren Extremitäten einschließlich Hüfte und Becken.

Die gesichtete Literatur beschränkt sich derzeit auf die Wirkung von Exoskeletten auf Belastungen und Beanspruchungen des Muskel-Skelett-Systems. Die wesentlichen Ergebnisse werden in der Folge anhand von fünf Leitfragen bzw. -aspekten aufgeführt. Zudem wird auf bedeutsame Limitationen der methodischen Qualität der gesichteten Publikationen hingewiesen sowie auf Beschränkungen bezüglich der untersuchten Tätigkeiten, die für die Arbeitswelt allenfalls punktuell repräsentativ sind. Die gesichteten Studienergebnisse weisen daher erhebliche Einschränkungen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere berufliche Tätigkeiten oder Anwendergruppen auf.

Kernaussage

2	Kernaussage	Stand (2020)
Eine präventive Wirkung von Exoskeletten auf Muskel-Skelett-Beschwerden oder sogar Muskel-Skelett-Erkrankungen kann auf Basis des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstands und der Erfahrungen aus der beruflichen Praxis nicht begründet werden, d.h. weder eine primär- noch eine sekundär- oder tertiärpräventive Wirkung.		
Begründung: Es liegen keine Studien vor, die zeigen, dass durch Verwendung eines Exoskeletts arbeitsassoziierte Muskel-Skelett-Beschwerden oder Muskel-Skelett-Erkrankungen verhindert werden.		
Konsensstärke: starker Konsens		

6.1 Exoskelette zur Unterstützung der oberen Extremitäten (einschl. Schulter, Kopf/Hals/Nacken)

Grundlage der folgenden Ausführungen sind 19 wissenschaftliche Studien, die sich mit Exoskeletten zur Unterstützung der oberen Extremitäten beschäftigt haben. Neun Studien beziehen sich auf passive Exoskelette, zehn auf aktive Exoskelette. Bei den Studien zu aktiven Exoskeletten handelt es sich überwiegend um Konzeptstudien, die sich mit der technischen Entwicklung dieser Assistenzsysteme befassen, jedoch kaum Aussagen zur Wirkung auf das Muskel-Skelett-System erlauben.

Passive Exoskelette

- 1) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung oder Beanspruchung der Muskulatur der oberen Extremitäten verringert werden?**
 - Bei Überkopfarbeit kann die Beanspruchung der Schultermuskulatur durch passive Exoskelette verringert werden (Huysamen *et al.* 2018, Kim *et al.* 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019).
 - Bei Tätigkeiten auf Schulterniveau ist unklar, ob die Beanspruchung der Schultermuskulatur durch passive Exoskelette, deren Unterstützung direkt an den Armen der Beschäftigten ansetzt, verringert wird (Kim *et al.* 2018a).
 - Bei statischer Haltearbeit kann die Belastung der Muskulatur lokal verringert werden (Spada *et al.* 2017, Liu *et al.* 2018).
 - Bei Hebe- und Tragetätigkeiten sind die Auswirkungen auf die Muskulatur unklar. In Abhängigkeit der Tätigkeit kann die muskuläre Belastung lokalisationsabhängig zu- oder abnehmen (Theurel *et al.* 2018).
- 2) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung der Gelenke der oberen Extremitäten verringert werden?**
 - Zu dieser Fragestellung waren keine Studien verfügbar.
- 3) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten eine subjektiv empfundene Belastungsminderung der oberen Extremitäten erreicht werden?**
 - Bei Überkopfarbeit und Arbeiten auf Schulterniveau kann durch Anwendung von Exoskeletten eine subjektiv empfundene Belastungsminderung der oberen Extremitäten auftreten (Huysamen *et al.* 2018, Kim *et al.* 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019). Unklar ist dies für längere und regelmäßige Anwendungen; hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.
 - Bei statischer Haltearbeit kann eine subjektive Entlastung durch Anwendung von Exoskeletten zur Unterstützung der oberen Extremität eintreten (Spada *et al.* 2017, Liu *et al.* 2018).
 - Bei Hebe- und Tragetätigkeiten kann eine subjektiv empfundene Belastungsminderung der oberen Extremität auftreten (Theurel *et al.* 2018).
- 4) Können durch den Einsatz von Exoskeletten Belastungen oder Beanspruchungen erhöht werden bzw. zusätzliche Belastungs- oder Beanspruchungsarten entstehen?**

Aussagen beschränkt auf Belastung oder Beanspruchung

- Druckstellen und Beschwerden an den Exoskelett-Mensch-Kontaktflächen treten häufig auf (Huysamen *et al.* 2018, Kim *et al.* 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019). Unklar ist, ob diese bei längerer Anwendung im Sinne einer Gewöhnung ab- oder zunehmen; hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.
- Abhängig von der Tätigkeit und dem Modell des Exoskeletts können muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchungen in anderen Körperregionen zunehmen (Huysamen *et al.* 2018).
- In den Gelenken der oberen Extremität können Bewegungseinschränkungen durch Verwendung von Exoskeletten auftreten (Kim *et al.* 2018b).
- Zu möglichen Änderungen des Bewegungsmusters im Sinne einer potentiell gesundheitsgefährdenden oder -fördernden Anpassung durch Verwendung eines Exoskeletts wurden keine Ergebnisse gefunden.

5) Sonstige Aspekte/Wirkungen

- Bei hoch belastender Überkopfarbeit (mit Atemmaske und handgeführtem Werkzeug) kann die Exoskelettnutzung eine Verringerung der Herz-Kreislauf-Beanspruchung bewirken (Moyon *et al.* 2018), wohingegen bei kurzzeitiger Durchführung von Hebe- und Tragetätigkeiten ein tendenzieller Anstieg der Herz-Kreislauf-Beanspruchung beobachtet wurde (Theurel *et al.* 2018).

Aktive Exoskelette

Aufgrund der begrenzten Anzahl und der Zielsetzungen der Studien, die aktive Exoskelette berücksichtigten, sind keine gesicherten Aussagen zur Wirkung auf muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchungen möglich.

6.2 Exoskelette zur Unterstützung des Rumpfes einschl. der Wirbelsäule

Grundlage der Ausführungen sind 22 wissenschaftliche Studien, die sich mit Exoskeletten zur Unterstützung des Rumpfes, Oberkörpers bzw. der Wirbelsäule beschäftigt haben. Fünfzehn Studien beziehen sich auf passive Exoskelette, sieben auf aktive Exoskelette. Bei den Studien handelt es sich einerseits um Konzeptstudien, die sich überwiegend mit der Identifizierung der wesentlichsten Einflussgrößen und der technischen Entwicklung bzw. Realisierbarkeit dieser Assistenzsysteme befassen, jedoch nur ansatzweise Aussagen zur Wirkung auf das Muskel-Skelett-System erlauben. Andererseits werden exemplarische, in der Regel äußerst zeitbegrenzte Anwendungen prototypischer Lösungen vorgestellt, die die selektive Wirkung auf Skelettbelastung, Muskelaktivität oder -beanspruchung, Tragekomfort und -diskomfort oder beispielsweise auf Ermüdung bzw. Ausdauer beschreiben.

Passive Exoskelette

1) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung oder Beanspruchung der Muskulatur des Rumpfes verringert werden?

- Der Einsatz von passiven Exoskeletten führte zu Reduktionen der muskulären Beanspruchung
 - am Rücken:
 - lumbaler und thorakaler M. erector spinae (Abdoli-Eramaki *et al.* 2006, Abdoli-Eramaki and Stevenson 2008, Frost *et al.* 2009, Godwin 2009, Graham *et al.* 2009, Lotz *et al.* 2009, Ulrey and Fathallah 2013),
 - M. iliocostalis und M. longissimus lumborum (Koopman *et al.* 2019),
 - an der Schulter: M. trapezius pars ascendens (Bosch *et al.* 2016),
 - an der Bauchseite: M. rectus abdominis (Abdoli-Eramaki and Stevenson 2008, Bosch *et al.* 2016) und
 - am Oberschenkel: M. biceps femoris (Frost *et al.* 2009).
- Eine andere (zweigeteilte, geschlechtsstratifizierte) Studie zeigte eine Verzögerung der Ermüdung der Rückenmuskulatur bei repetitiven Hebevorgängen bei der Verwendung eines Exoskeletts (Godwin *et al.* 2009, Lotz *et al.* 2009).

2) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung der Wirbelsäule verringert werden?

- Der Einsatz von passiven Exoskeletten führte zu Reduktionen der berechneten Bandscheiben-Sagittalmomente (Koopman *et al.* 2019) und -Flexionsmomente im Bereich des vierten und fünften Lendenwirbels (Frost *et al.* 2009).

3) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten eine subjektiv empfundene Belastungsminderung des Rumpfes erreicht werden?

- Der Einsatz von passiven Exoskeletten führte zu Reduktionen des Diskomforts beim sagittalen Heben von leichten Lasten (Abdoli-Eramaki *et al.* 2006), bei simulierten Montagetätigkeiten (Bosch *et al.* 2016) sowie beim Stehen mit verschiedenen stark vorgeneigtem Oberkörper (Koopman *et al.* 2019) und stark vorgeneigtem Oberkörper bei gestreckten Beinen (Ulrey and Fathallah 2013).

4) Können durch den Einsatz von Exoskeletten Belastungen oder Beanspruchungen erhöht werden bzw. zusätzliche Belastungs- oder Beanspruchungsarten entstehen?

- Der Einsatz von passiven Exoskeletten führte zu einer Änderung des Bewegungsverhaltens mit Exoskelett auf Basis von 3D-Bewegungsanalysen (Sadler *et al.* 2011). Eine weitere Studie berichtete von einer erhöhten Aktivität an der Schulter (M. trapezius pars descendens) bei Verwendung des Exoskeletts, verursacht durch eine Änderung des Bewegungsverhaltens (Amandels 2018).
- Als erhöhte Belastungen wurden höhere Kompressions- und Sagittalscherkräfte an den Bandscheiben im Bereich der dritten und vierten Lendenwirbelkörper bzw. des fünften Lendenwirbelkörpers und des ersten Kreuzbeinwirbels (Weston *et al.* 2018) gefunden.
- An drei Arbeitsplätzen in der Automobilproduktion wurde durch Befragungen eine Erhöhung der Belastung und des Diskomfortempfindens in der Brustregion, an den Oberschenkeln und im Schulterbereich (Abstützungsfläche des Exoskeletts) sowie an den Knien dokumentiert (Hensel and Keil 2018).
- Zwei Literaturquellen beschrieben eine Begrenzung der maximalen Vorneigung durch das Tragen des Exoskeletts (Ulrey and Fathallah 2013, Picchiotti *et al.* 2019).
- Der Einsatz von passiven Exoskeletten führte zu Erhöhungen der muskulären Beanspruchung

Aussagen beschränkt auf Belastung oder Beanspruchung

- am Rücken, abhängig von der Arbeitshöhe:
 - M. erector spinae (Weston *et al.* 2018, Koopman *et al.* 2019),
 - M. latissimus dorsi (Weston *et al.* 2018)
- an der Bauchseite:
 - M. obliquus externus abdominis (Abdoli-Eramaki *et al.* 2006, Weston *et al.* 2018, Koopman *et al.* 2019),
 - M. obliquus internus abdominis (Weston *et al.* 2018, Koopman *et al.* 2019),
 - M. rectus abdominis (Abdoli-Eramaki *et al.* 2006, Weston *et al.* 2018),
- am Schienbein: M. tibialis anterior (Ulrey and Fathallah 2013),
- am Oberschenkel: M. quadriceps femoris (Frost *et al.* 2009).

5) Sonstige Aspekte/Wirkungen

-

Aktive Exoskelette

Aufgrund der begrenzten Anzahl und der Zielsetzungen der Studien, die aktive Exoskelette berücksichtigten, sind keine gesicherten Aussagen zur Wirkung auf muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchungen möglich. Gleichwohl werden im Folgenden die vorhandenen Ansätze skizziert.

1) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung oder Beanspruchung der Muskulatur des Rumpfes verringert werden?

- Der Einsatz von aktiven Exoskeletten führte zu Reduktionen der muskulären Beanspruchung
 - am Rücken
 - M. erector spinae (Muramatsu 2013, Huysamen *et al.* 2018, von Glinski 2019)
 - M. iliocostalis (Toxiri 2018)
- beim
- Schneeschaukeln (Miura *et al.* 2018a),
 - sagittalen Heben von Lasten im Bereich von 7,5 - 17 kg (Huysamen *et al.* 2018, Miura *et al.* 2018b, Toxiri 2018, von Glinski 2019) sowie
 - Aufrichten des Oberkörpers (Muramatsu 2013).

2) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung der Wirbelsäule verringert werden?

- Der Einsatz von aktiven Exoskeletten führte zu Reduktionen der berechneten Bandscheiben-Kompressionskräfte (Toxiri 2015).

3) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten eine subjektiv empfundene Belastungsminderung des Rumpfes erreicht werden?

- Hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.

4) Können durch den Einsatz von Exoskeletten Belastungen oder Beanspruchungen erhöht werden bzw. zusätzliche Belastungs- oder Beanspruchungsarten entstehen?

- Hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.

5) Sonstige Aspekte/Wirkungen

- Die Autoren Muramatsu und Kollegen weisen darauf hin, dass ein Rumpfunterstützungs-Exoskelett nicht starr sein sollte, um die im Berufsalltag vorkommende Torsion und Seitbeugung zu ermöglichen (Muramatsu 2013).
- Die Autoren Toxiri und Kollegen weisen darauf hin, dass bei einem Rumpfunterstützungs-Exoskelett das Aufrichtmoment über einen möglichst großen Hebelarm aufgebracht werden sollte. Die Kraftübertragung auf Rumpf/Torso sollte idealerweise senkrecht zur Rumpfkontur (= mittels Normalkräfte) erfolgen (Toxiri 2015).

6.3 Exoskelette zur Unterstützung der unteren Extremitäten einschl. Hüfte und Becken

Grundlage der folgenden Ausführungen bilden fünf wissenschaftliche Studien, welche sich mit Exoskeletten zur Unterstützung der unteren Extremitäten beschäftigt haben. Bei allen, mit Ausnahme einer Studie, handelt es sich um Konferenzbeiträge ohne Peer Review. Die vorliegenden Exoskelett-Studien wurden zum großen Teil unter einschränkenden Rahmenbedingungen durchgeführt. Darunter finden sich Kurzzeitmessungen im Labor und Einzelfalluntersuchungen. Darüber hinaus ist fraglich, ob die hier durchgeführten Untersuchungen ein vollständiges Bild des Einflusses durch das Tragen von Exoskeletten auf den Körper darstellen können. Die Studien, insbesondere die zu aktiven Exoskeletten, sind hauptsächlich Konzeptstudien und haben sich überwiegend mit der technischen Entwicklung von exoskelettalen Assistenzsystemen befasst. Des Weiteren nahmen an den Studien nur sehr wenige Versuchspersonen teil ($n = 1-9$). Eine Ausnahme bildet die Studie von Luger und Kollegen (Luger *et al.* 2019b), welche an 45 Versuchspersonen durchgeführt wurde.

Passive Exoskelette

1) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung oder Beanspruchung der Muskulatur der unteren Extremitäten verringert werden?

- Bei passiven Exoskeletten, die als mobiles Sitzmittel dienen, wird das Körpergewicht über das Exoskelett in den Boden umgeleitet, wodurch die muskuläre Belastung in der Wadenmuskulatur reduziert werden kann (Luger *et al.* 2019b).
- Beim Gehen kann es durch passive Exoskelette zu einer Reduktion der muskulären Beanspruchung in der Wadenmuskulatur kommen (Van Dijk W 2011).

2) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung der unteren Extremitäten verringert werden?

- Bei passiven Exoskeletten, die als mobiles Sitzmittel dienen, wird das Körpergewicht über das Exoskelett in den Boden umgeleitet, wodurch die durch das Körpergewicht induzierte Belastung der gesamten unteren Extremität (inklusive der Knie- und Sprunggelenke) reduziert werden kann (Luger *et al.* 2019b).

Aussagen beschränkt auf Belastung oder Beanspruchung

- Über eine Belastungsminderung der Gelenke der unteren Extremitäten durch den Einsatz von passiven Exoskeletten beim Gehen liegen keine Studienergebnisse vor.
- 3) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten eine subjektiv empfundene Belastungsminderung der unteren Extremitäten erreicht werden?**
- Hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.
- 4) Können durch den Einsatz von Exoskeletten Belastungen oder Beanspruchungen erhöht werden bzw. zusätzliche Belastungs- oder Beanspruchungsarten entstehen?**
- Bei passiven Exoskeletten, die als mobiles Sitzmittel dienen, kann es zu Druckstellen und Beschwerden an den Kontaktstellen zwischen Mensch und Exoskelett kommen (Luger *et al.* 2019b).
 - Bei passiven Exoskeletten, die als mobiles Sitzmittel dienen, kann es zu einer gesteigerten muskulären Belastung in der vorderen Oberschenkelmuskulatur kommen (Luger *et al.* 2019b).
 - Beim Gehen kann es durch passive Exoskelette zu einer Zunahme der Aktivität in der Muskulatur des vorderen Unterschenkels und Oberschenkels kommen (Van Dijk W 2011).
- 5) Sonstige Aspekte/Wirkungen**
- Bei passiven Exoskeletten, die als mobiles Sitzmittel dienen, können Einschränkungen in der Standstabilität auftreten (Luger *et al.* 2019b).

Aktive Exoskelette

- 1) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung oder Beanspruchung der Muskulatur der unteren Extremitäten verringert werden?**
- Beim Gehen kann es durch aktive Exoskelette zu Änderungen der muskulären Beanspruchung kommen, mit einer Reduktion in der Wadenmuskulatur und der vorderen Oberschenkelmuskulatur (Kim *et al.* 2013).
- 2) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten die Belastung der unteren Extremitäten verringert werden?**
- Hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.
- 3) Kann durch den Einsatz von Exoskeletten eine subjektiv empfundene Belastungsminderung der Unteren Extremitäten erreicht werden?**
- Hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.
- 4) Können durch den Einsatz von Exoskeletten Belastungen oder Beanspruchungen erhöht werden bzw. zusätzliche Belastungs- oder Beanspruchungsarten entstehen?**
- Hierzu liegen keine Studienergebnisse vor.
- 5) Sonstige Aspekte/Wirkungen**
-

6.4 Empfehlung für die Primärprävention von MSB

Die Frage, ob Exoskelette zur Unterstützung von beruflichen Tätigkeiten eine primärpräventive Wirkung auf Muskel-Skelett-Beschwerden oder gar Muskel-Skelett-Erkrankungen aufweisen, kann auf Basis des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstands und der Erfahrungen aus der beruflichen Praxis nicht beantwortet werden. Somit erfolgt diesbezüglich keine Empfehlung – weder in die eine noch andere Richtung. Die gesichteten Studien zeigen zwar häufig – jedoch nicht für jede Tätigkeit – eine gewisse Belastungsminderung in den unterstützten Körperregionen, allerdings wird häufig von Diskomfort an den Exoskelett-Mensch-Kontaktstellen und teilweise von Belastungs-/Beanspruchungszunahmen in anderen Körperbereichen berichtet. Sämtliche Studien repräsentieren Kurzzeitbetrachtungen mit kurzen Interventionszeiträumen, während derer präventive Wirkungen weder erwartet noch nachgewiesen werden können.

11	Empfehlung	Stand (2020)
So lange ein gesundheitlicher Vorteil durch die Verwendung von Exoskeletten bei beruflichen Tätigkeiten nicht durch wissenschaftliche Evidenz gesichert ist, soll die Nutzung eines Exoskeletts für die Beschäftigten freiwillig sein.		
<p>Begründung</p> <p>Ohne einen gesicherten wissenschaftliche Nachweis zur präventiven Wirkung von Exoskeletten auf Muskel-Skelett-Beschwerden oder -Erkrankungen wäre es unangemessen Beschäftigte zur Exoskelettverwendung zu verpflichten, insbesondere da im Moment mögliche negative Auswirkungen durch Exoskelette, ebenso wie vermeintlich positive Wirkungen, nicht ausgeschlossen werden können (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Luger <i>et al.</i> 2019b).</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

12	Empfehlung	Stand (2020)
<p>A. Die Anwendung von Exoskeletten soll medizinisch-technisch durch Praktiker des Arbeitsschutzes, insbesondere den betriebsbetreuenden Arzt, überwacht werden.</p> <p>B. Dabei sollten Beschäftigte regelmäßig befragt sowie eine regelmäßige körperliche Untersuchung durch den betriebsbetreuenden Arzt angeboten werden.</p>		
<p>Begründung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckstellen und Beschwerden an den Exoskelett-Mensch-Schnittstellen treten häufig auf (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Kim <i>et al.</i> 2018a, Alabdulkarim and Nussbaum 2019, Luger <i>et al.</i> 2019b). - Abhängig von der Tätigkeit und dem Exoskelettmodell können muskuloskelettale Belastungen und Beanspruchungen in anderen Körperregionen zunehmen (Huysamen <i>et al.</i> 2018, Luger <i>et al.</i> 2019b). - In den Gelenken der oberen Extremität kann es zu Bewegungseinschränkungen durch Exoskelette kommen (Kim <i>et al.</i> 2018b). 		
Konsensstärke: starker Konsens		

7. Sekundär- und Tertiärprävention von Muskel-Skelett-Beschwerden durch die Verwendung von Exoskeletten – Aussagen abgeleitet aus Befunden an Gesunden

Präambel

Generell gilt sowohl für die Sekundär- als auch für die Tertiärprävention, dass keine Studien gefunden wurden, welche sich explizit mit diesem Thema beschäftigt haben und welche den Einsatz von Exoskeletten bei gefährdeten Personen mit MSB oder MSE untersucht haben. Die in diesem Kapitel formulierten Empfehlungen basieren auf einer konsolidierten Expertenmeinung bzw. sind aus Untersuchungen mit gesunden Probanden abgeleitet, wobei offen bleiben muss, ob sich die bei Gesunden gewonnenen Erkenntnisse ohne Weiteres auf Personen mit MSB übertragen lassen. Eine sekundär- oder tertiärpräventive Wirkung von Exoskeletten auf MSB oder MSE kann auf Basis des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstands und der Erfahrungen aus der beruflichen Praxis nicht begründet werden. Offen bleibt auch, ob im Rahmen der Sekundär- bzw. Tertiärprävention bevorzugt ein aktives oder ein passives Exoskelett zum Einsatz kommen sollte.

Kernaussage

3	Kernaussage	Stand (2020)
	Es besteht keine ausreichende Evidenz zum Einsatz von Exoskeletten bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenden Strukturen hinsichtlich einer Symptomlinderung oder Vorbeugung einer Symptomverschlimmerung.	
	Begründung: Diese Frage kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht valide beantwortet werden, da sich aus den vorliegenden Probandenstudien diesbezüglich keine Aussagen ableiten lassen. Aus Studien an gesunden Probanden ergeben sich Anhaltspunkte, dass höhere bzw. neue relevante Belastungen an anderen Körperregionen auftreten können.	
	Konsensstärke: starker Konsens	

7.1 Mögliche Entlastung der geschädigten Körperstruktur durch ein Exoskelett

Viele der gesichteten Studien deuten darauf hin, dass es in der durch das Exoskelett unterstützten Körperregion zu einer gewissen Belastungsreduktion kommt (de Looze *et al.* 2016, Theurel *et al.* 2018). Bei einigen MSB oder MSE wie z.B. der Koxarthrose ist das „gezielte Entlasten der geschädigten Strukturen“ durch unterschiedliche Maßnahmen Teil der Therapie (Matziolis 2019). Somit könnten Exoskelette durchaus einen Teil von arbeitsbezogenen Maßnahmen im Rahmen der Sekundär- und Tertiärprävention darstellen. Unklar ist jedoch, ob die in Studien beschriebenen

Sekundär- und Tertiärprävention von Muskel-Skelett-Beschwerden durch die Verwendung von Exoskeletten – Aussagen abgeleitet aus Befunden an Gesunden

Belastungsreduktionen gleichermaßen in Gelenkstrukturen, Strukturen der Wirbelsäule oder der Muskulatur wirksam werden und ob diese z.B. von individuellen Faktoren des Nutzers (Körpergröße, Körpergewicht, Bewegungsverhalten) abhängen. Ferner ist gänzlich unbekannt, ob die erzielte Belastungsreduktion überhaupt ausreichend ist, um bei beruflichen Tätigkeiten mit Exoskelettunterstützung eine Symptomlinderung bei bestehenden MSB oder MSE zu erzielen oder gar einer weiteren Verschlimmerung von Beschwerden vorzubeugen.

7.2 Kontraindikationen für den Einsatz eines Exoskeletts im Rahmen der Sekundär- und Tertiärprävention

Aus der Literatur konnten keine direkten Kontraindikationen zur Nutzung eines Exoskeletts in der beruflichen Sekundär- und Tertiärprävention gefunden werden. Dennoch zeigen mehrere Studien, dass eine Umverteilung der Last auf andere Körperregionen eintreten kann bzw. neue Belastungen entstehen (Theurel *et al.* 2018, Weston *et al.* 2018). Daher scheint der Einsatz von Exoskeletten bei einem akuten Krankheitsbild bzw. bei herabgesetzter Belastbarkeit aufgrund von Komorbiditäten fragwürdig, da unklar ist, welche Wechselwirkungen dabei eintreten können. Ferner können anhaltender bzw. erhöhter Diskomfort z.B. an den Kontaktstellen zwischen Exoskelett und Nutzer/innen oder das Aneignen eines durch das Exoskelett veränderten Bewegungsmusters, welches ggf. später ohne die Absicherung des Exoskeletts schädlich sein könnte, als Kontraindikationen betrachtet werden. Auch kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass es zur Atrophie der entlasteten gelenkumgebenden Muskulatur und damit potentiell langfristig zu einer fehlenden muskulären Sicherung des unterstützten Gelenks kommt.

Aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Studien können diese möglichen Kontraindikationen nur im Rahmen einer regelmäßigen Beobachtung und Befragung von Beschäftigten, die ein Exoskelett nutzen, erkannt werden. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der Einsatz des Exoskeletts nicht zu einem Wiederauftreten bzw. einer Verschlimmerung von bestehenden oder einem Neuauftreten von Beschwerden führt.

Exoskelette können nicht nur im beruflichen Kontext, sondern auch in der Rehabilitation etwa von traumatischen Querschnittslähmungen eingesetzt werden (Cruciger *et al.* 2016). In Ermangelung von Studien zur Sekundär- und Tertiärprävention im beruflichen Kontext können Ergebnisse und Erfahrungen aus Rehabilitationsstudien zur Beurteilung möglicher Kontraindikationen mit herangezogen werden.

7.3 Einsatzdauer von Exoskeletten in der Sekundär- und Tertiärprävention

Es ist derzeit unklar, inwieweit die tägliche Einsatzdauer sowie die generelle Dauer des Einsatzes von Exoskeletten auch in Abhängigkeit von Beschwerdetyp und -ausprägung befristet werden sollte. Die tägliche Einsatzdauer sowie der Einsatz des Exoskeletts sollte daher im Rahmen der Sekundär- bzw. Tertiärprävention im Einzelfall, in Abhängigkeit vom Exoskelett-Typ und der Arbeitstätigkeit, festgelegt und im Anschluss engmaschig überprüft werden.

7.4 Empfehlung für die Sekundärprävention bei MSB

7.4.1 Möglichkeiten für den Einsatz von Exoskeletten in Abhängigkeit von der Anamnese von Patienten

13	Empfehlung	Stand (2020)
Der Einsatz eines Exoskeletts bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskeln und umgebenden Strukturen kann erwogen werden.		
Begründung: Sofern eine akute Erkrankung ausgeschlossen werden kann, keine Kontraindikationen vorliegen und keine zentralwirksamen Medikamente eingenommen werden, spricht nichts gegen den Einsatz eines Exoskeletts bei diesen Patienten, sofern der Einsatz unter ärztlicher Kontrolle stattfindet. Studien über den Einsatz eines Exoskeletts bei diesen Patienten wurden nicht gefunden.		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.4.2 Kontraindikationen für den Einsatz von Exoskeletten

14	Empfehlung	Stand (2020)
Ein Exoskelett soll bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenden Strukturen nicht eingesetzt werden, wenn es sich um ein akutes Krankheitsbild handelt oder wenn die Belastbarkeit durch Komorbiditäten (z.B. Einschränkungen der kardiovaskulären Belastbarkeit, deutlich eingeschränkte Gelenkbeweglichkeit) herabgesetzt ist.		
Begründung: Da in der Literatur keine umfassenden Langzeitstudien über Monate bzw. Jahre gefunden wurden, handelt es sich bei der Antwort um eine Expertenmeinung, die sich unter anderem auf die Ergebnisse der Studien von Sylla <i>et al.</i> (2014), Theurel <i>et al.</i> (2018), Bosch <i>et al.</i> (2016), de Looze <i>et al.</i> (2016) und Abdulkarim & Nussbaum (2019) stützt.		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.4.3 Körperliche Voraussetzungen für den Einsatz von Exoskeletten

15	Empfehlung	Stand (2020)
Der Beschäftigte mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenden Strukturen soll in der Lage sein, die zu unterstützende Funktion eigenständig auch ohne Exoskelett durchzuführen.		
<p>Begründung:</p> <p>Dazu Überlegungen am Beispiel eines passiven Stuhl-Exosketts zur Entlastung beim langen Stehen: Benutzer sollten auch ohne die Unterstützung in der Lage sein, eine Kniebeuge („Squat“) bis zur gewünschten Sitzhöhe durchzuführen, da ansonsten die Gefahr besteht, beim unkontrollierten Absetzen auf das Exoskelett das Gleichgewicht zu verlieren und zu stürzen.</p> <p>Beim Einsatz von aktiven Exoskeletten, beispielsweise für die obere Extremität, muss eine vollständige motorische Kontrolle über das zu unterstützende Bewegungsausmaß des Gelenkes vorhanden sein, um jederzeit die Kontrolle über das Exoskelett behalten zu können.</p> <p>Zusätzlich sollen auch die kognitiven Fähigkeiten vorhanden sein, das Exoskelett und damit verbundene Chancen und Risiken zu verstehen, um das Produkt sicher und bestimmungsgemäß einzusetzen zu können.</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.4.4 Begleitung des Einsatzes von Exoskeletten im Rahmen der Sekundärprävention

16	Empfehlung	Stand (2020)
<p>A. Der Einsatz eines Exosketts bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskeln und umgebenden Strukturen soll anhand festzulegender Kriterien engmaschig durch den betriebsbetreuenden Arzt kontrolliert werden.</p> <p>B. Kriterien können Akzeptanz, Tragekomfort, Schmerz im betroffenen Körperabschnitt, Neuentstehung von Beschwerden in anderen Körperbereichen, Ermüdungserscheinungen, Druckstellen, allgemeine bzw. bleibende Bewegungseinschränkungen durch das Exoskelett, Allergien sowie kardiopulmonale Parameter/Belastung (Blutdruck, Herzschlagfrequenz) sein.</p> <p>C. Eine Dokumentation von Kurzzeiteffekten (Evaluation nach 1 Woche und 4-8 Wochen) als auch von Langzeiteffekten (Evaluation nach 6-12 Monaten) sollte erfolgen.</p>		
<p>Begründung:</p> <p>Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Studien und mangelnder Erfahrung aus der betrieblichen Praxis erscheint eine engmaschige Kontrolle beim Einsatz von Exoskeletten im Rahmen der Sekundärprävention notwendig, um insbesondere mögliche negative Wirkungen frühzeitig zu erkennen und diesen zukünftig vorzubeugen.</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.5 Empfehlungen für die Tertiärprävention bei MSE

7.5.1 Möglichkeiten für den Einsatz von Exoskeletten bei der stufenweisen Wiedereingliederung von Patienten

17	Empfehlung	Stand (2020)
Der Einsatz eines Exoskeletts im Rahmen der Wiedereingliederung bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenden Strukturen kann erwogen werden.		
<p>Begründung:</p> <p>Der Einsatz ist in jedem Falle eine Einzelfallentscheidung. Neben der reinen Betrachtung der Tätigkeit sollte immer auch das Arbeitsumfeld und alle weiteren Tätigkeiten bzw. mögliche Veränderungen der Arbeitsaufgabe bewertet werden, die ggf. mit dem Exoskelett durchgeführt werden müssen. Sollte eine Tätigkeit nicht mit dem Exoskelett ausgeführt werden können oder sollen, müssen auch Zeiten zum An- und Ablegen des Exoskeletts in Betracht gezogen werden, wodurch der sinnvolle Einsatz auch logistisch beeinträchtigt sein kann. Baltrusch <i>et al.</i> (2018) betonen die Berücksichtigung der Arbeitsumgebung und den ausschließlich bestimmungsgemäßen Gebrauch der Exoskelette. Die Notwendigkeit der genauen Analyse des spezifischen Arbeitsplatzes und aller inkludierten Tätigkeiten wird beispielsweise von Theurel <i>et al.</i> (2018) beschrieben.</p> <p>Ein sinnvoller Einsatz ist abhängig von den Tätigkeiten, der körperlichen Beeinträchtigung und der Arbeitsumgebung.</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.5.2 Kontraindikationen für den Einsatz von Exoskeletten bei der schrittweisen Wiedereingliederung von Patienten

18	Empfehlung	Stand (2020)
Ein Exoskelett soll bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenden Strukturen im Rahmen der Wiedereingliederung nicht eingesetzt werden, wenn es sich um ein akutes Krankheitsbild handelt oder wenn die Belastbarkeit durch Komorbiditäten (z.B. Einschränkungen der kardiovaskulären Belastbarkeit, deutlich eingeschränkte Gelenkbeweglichkeit) herabgesetzt ist.		
<p>Begründung:</p> <p>Da in der Literatur keine umfassenden Langzeitstudien über Monate bzw. Jahre gefunden wurden, handelt es sich bei der Antwort um eine Expertenmeinung, die sich unter anderem auf die Ergebnisse der Studien von Sylla <i>et al.</i> (2014), Theurel <i>et al.</i> (2018), Bosch <i>et al.</i> (2016), de Looze <i>et al.</i> (2016) und Abdulkarim & Nussbaum (2019) stützt.</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.5.3 Körperliche Voraussetzungen für den Einsatz von Exoskeletten bei der schrittweisen Wiedereingliederung von Patienten

19	Empfehlung	Stand (2020)
Der Beschäftigte mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskulatur und umgebenen Strukturen soll bei der Wiedereingliederung in der Lage sein, die zu unterstützende Funktion eigenständig auch ohne Exoskelett durchzuführen.		
<p>Begründung:</p> <p>Die zu unterstützende Funktion inklusive der zu hantierenden Lasten sollte auch ohne Exoskelett möglich sein, so dass im Falle einer Fehlfunktion des Exoskeletts (plötzliches Fehlen der Unterstützung) kein Schaden für den Beschäftigten eintritt.</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

7.5.4 Begleitung des Einsatzes von Exoskeletten im Rahmen der Tertiärprävention

20	Empfehlung	Stand (2020)
<p>A. Der Einsatz eines Exoskeletts bei Beschäftigten mit Rückenschmerzen, Gelenkbeschwerden oder Schmerzen der Muskeln und umgebenden Strukturen soll im Rahmen der Wiedereingliederung anhand festzulegender Kriterien engmaschig durch den betriebsbetreuenden Arzt kontrolliert werden.</p> <p>B. Kriterien können Akzeptanz, Tragekomfort, Schmerz im betroffenen Körperabschnitt, Neuentstehung von Beschwerden in anderen Körperbereichen, Ermüdungserscheinungen, Druckstellen, allgemeine bzw. bleibende Bewegungseinschränkungen durch das Exoskelett, Allergien sowie kardiopulmonale Parameter/Belastung (Blutdruck, Herzschlagfrequenz) sein.</p> <p>C. Eine Dokumentation von Kurzzeiteffekten (Evaluation nach 1 Woche und 4-8 Wochen) als auch von Langzeiteffekten (Evaluation nach 6-12 Monaten) sollte erfolgen.</p>		
<p>Begründung:</p> <p>Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Studien und mangelnder Erfahrung aus der betrieblichen Praxis erscheint eine engmaschige Kontrolle beim Einsatz von Exoskeletten im Rahmen der Tertiärprävention notwendig, um insbesondere mögliche negative Wirkungen frühzeitig zu erkennen und diesen zukünftig vorzubeugen.</p>		
Konsensstärke: starker Konsens		

8. Sonstige Wirkungen von Exoskeletten

In der aktuellen Diskussion um den Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen wird neben einer möglichen präventiven Wirkung auch die Thematik der Produktivitätssteigerung angesprochen. Obwohl dies nicht Inhalt dieser Leitlinie ist, soll anhand der gesichteten Studien auch eine Aussage zu dieser Thematik getroffen werden.

Abhängig von der Tätigkeit (Theurel *et al.* 2018), dem Exoskelettmodell (Alabdulkarim and Nussbaum 2019) und den individuellen Voraussetzungen der Nutzer/innen (Liu *et al.* 2018) können sich leistungssteigernde Wirkungen, jedoch ebenso leistungsmindernde Wirkungen durch die Anwendung eines Exoskeletts ergeben.

Kernaussage

4	Kernaussage	Stand (2020)
	Es liegt keine Evidenz vor, um eine Aussage zu formulieren, wie die Anwendung von Exoskeletten die Bearbeitungsdauer oder Fehlerrate beeinflussen kann.	
	Begründung: Einige Studien zeigen (Theurel <i>et al.</i> 2018, Alabdulkarim and Nussbaum 2019) eine tätigkeitsabhängige Verlängerung der Bearbeitungsdauer und Erhöhung von Fehlern durch Verwendung von Exoskeletten. Offen ist, sofern es zu einer längeren Bearbeitungsdauer und erhöhten Fehlerraten kommt, ob diese nach einer ausreichenden Gewöhnung an das Exoskelett zurückgehen oder sogar verschwinden.	
	Konsensstärke: Konsens	

9. Wichtige Forschungsfragen

Die Leitliniengruppe hat bei der Erstellung dieser Leitlinie eine Vielzahl ungeklärter wissenschaftlicher Fragestellungen hinsichtlich der Nutzung von Exoskeletten zur Unterstützung beruflicher Tätigkeiten identifiziert. Im Folgenden werden fünf wesentliche Forschungsfelder und Fragestellungen für zukünftige Forschung skizziert.

Forschungsfeld 1: Prävention von Muskel-Skelett-Beschwerden und -Erkrankungen durch Exoskelette

Kann eine regelmäßige Nutzung von Exoskeletten arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Beschwerden und -Erkrankungen vermeiden (Primärprävention), Symptome von Beschäftigten mit MSE lindern bzw. einer Verschlimmerung der MSE entgegenwirken (Sekundärprävention) oder bei Beschäftigten mit MSE den Verlauf der Erkrankung verlangsamen bzw. bei der beruflichen Wiedereingliederung unterstützen (Tertiärprävention)? Auf diese zentralen Fragen der vorliegenden Leitlinie konnten in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur keine Antworten gefunden werden. Diese Fragen sollten idealerweise mittels randomisiert-kontrollierter Studien untersucht werden. Wichtig ist dabei ein ausreichend langer Untersuchungszeitraum von mindestens 4 Monaten (besser 6 Monate und mehr) und mit einer ausreichend großen Stichprobe.

Forschungsfeld 2: Wirkung von Exoskeletten auf das Muskel-Skelett-System

Die gesichtete wissenschaftliche Literatur deutet darauf hin, dass Exoskelette zur Unterstützung beruflicher Tätigkeiten arbeitsbedingte Belastungen und damit einhergehende Beanspruchungen modifizieren können. Häufig wurde eine potentielle Wirkung oder nicht-vorhandene Wirkung auf andere Körperregionen – als die vom Exoskelett unterstützte Region – nicht untersucht. Dies scheint aufgrund der in einigen beschriebenen Publikationen vorhandenen Belastungsumverteilung auf andere Körperregionen zwingend notwendig. Auch gibt es kaum Untersuchungen, inwieweit sich die Höhe des Unterstützungsgrades auf Belastungen und Beanspruchungen des Muskel-Skelett-Systems auswirkt bzw. welche beruflichen Tätigkeiten welchen Grad an Unterstützung erfordern.

Forschungsfeld 3: Wirkung von Exoskeletten in Abhängigkeit von den beruflichen Tätigkeiten und Eigenschaften der Nutzer

Die wenigen Studien, die bisher Exoskelette zur Unterstützung von beruflichen Tätigkeiten untersucht haben, haben zu meist junge, gesunde und männliche Probanden untersucht. Eine Vielzahl der gesichteten Publikationen (z.B. Miura *et al.* 2018a, Moyon *et al.* 2018, Spada *et al.* 2017) zeigte deutliche Limitationen in der methodischen Qualität und es wurden für die Arbeitswelt allenfalls punktuell repräsentative Tätigkeiten untersucht. Die Wirkung von Exoskeletten sollte an

unterschiedlichen Probandenkollektiven (z.B. junge vs. ältere Beschäftigte; männliche vs. weibliche Beschäftigte; Beschäftigte mit MSB oder MSE vs. gesunde Beschäftigte) sowie bei unterschiedlichen für das Exoskelett in Frage kommenden Tätigkeiten untersucht werden. Hier könnte der Aufbau einer unternehmensübergreifenden Forschungsdatenbank (Register) zur Anwendung von Exoskeletten wichtige Erkenntnisse liefern. Gleichzeitig könnte ein solches Register auch die Grundlage für die vorgeschlagenen Kriterien der engmaschigen Kontrolle sowie die Dokumentation und Evaluation der Exoskelettanwendung an gewerblichen Arbeitsplätzen darstellen.

Forschungsfeld 4: Fragen der Arbeitssicherheit

Eine Studie (Luger *et al.* 2019b) deutet auf potentielle Einschränkungen der Standsicherheit bei Verwendung eines Exosketts für die untere Extremität hin. Ebenso könnte durch einen vergrößerten Platzbedarf durch die Exoskelettstrukturen an Arbeitsplätzen mit geringem Platzangebot ein erhöhtes Risiko für Arbeitsunfälle resultieren. Auch in Notfallsituationen, wie ein Brandfall in einer Fabrik, könnte ein Exoskelett mit einer erhöhten Gesundheitsgefährdung für die Nutzer/innen einhergehen. Diese arbeitssicherheitstechnischen Aspekte bei der Exoskelettnutzung sind bislang nicht wissenschaftlich untersucht worden. Die Durchführung einer spezifischen Gefährdungsbeurteilung mit Bezug zum verwendeten hat daher einen hohen Stellenwert (siehe Kapitel 5, Empfehlung 10).

Forschungsfeld 5: Sozialwissenschaftliche Aspekte bei der Verwendung von Exoskeletten

Neben einer potentiellen Wirkung von Exoskeletten auf das Muskel-Skelett-System gibt es im Bereich der sozialwissenschaftlichen Perspektive viele ungeklärte Fragestellungen bezüglich dieser Assistenzsysteme. Besonders vielversprechend erweisen sich hier die „Science and Technology Studies“ (Wissenschaft, Technik und Gesellschaft). Ein möglicher Fokus ist (1) die *Akzeptanz* auf Seiten der Beschäftigten aller Hierarchieebenen. Dies geht über eine reine Gebrauchstauglichkeitsbetrachtung hinaus, denn Erwartungen, Befürchtungen, zwischenmenschliche Probleminitiierung, berufliche Rollenbilder oder Fragen der Ästhetik spielen eine ebenso große Rolle wie praktische Fragen der konkreten Anwendung. Ein weiterer möglicher Fokus ist (2) der Aspekt der *Innovation*. Welcher Wandel und welche Konstanten gehen mit einer technischen Neuerung auf verschiedensten Ebenen einher? Was ist das eigentlich Innovative an einer Innovation wie Exoskeletten? Des Weiteren ist mit Bezug auf Forschungsfeld 3 die Perspektive der (3) *Inklusion* und *Diversität* für die Erforschung von Exoskeletten von Interesse. Versprechen sich Unternehmen von der Exoskelettnutzung in erster Linie eine Produktivitätssteigerung? Inwiefern können Exoskelette inklusivere Arbeitsplätze schaffen und bisher unterrepräsentierte Gruppen integrieren? Wo entstehen neue Ausschlüsse bzw. verhärten sich bestehende? Da bisher kaum

Wichtige Forschungsfragen

sozialwissenschaftliche Forschung zu Exoskeletten existiert, werden explorative Designs zunächst im Vordergrund stehen. Besonders vielversprechend wird es sein, nach Möglichkeit Prozesse und Praktiken vor Ort in Betrieben zu beobachten.