

Schlussbericht vom **26.08.2022**

zu IGF-Vorhaben Nr. 20905 BR

Thema

Planungsgrundlage für den Einsatz von Exoskeletten in der Kommissionierung (ExoKomm)

Berichtszeitraum

01.11.2019 bis 31.03.2022

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik (FE 1)

Technische Universität Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft (FE 2)

Gefördert durch:

1. Kurzfassung der Ergebnisse

Dieses Forschungsvorhaben verfolgte drei übergeordnete Ziele:

- **Ziel 1:** Erfassung des Status quo der operativen Kommissionieraufgaben und Belastungssituationen sowie die Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit und Exoskeletterprobung in Feldstudien
- **Ziel 2:** Untersuchung der Kommissionierleistung ohne und mit Exoskelettanwendung und Ursachen für ggf. vorhandene Veränderungen in einer Laborstudie
- **Ziel 3:** Erstellung einer Handlungsanleitung für den Einsatz von Exoskeletten

Für die manuelle Kommissionierung sind Exoskelette zur Rumpfunterstützung relevant, da hauptsächlich die Belastungsart Heben, Halten und Tragen vorliegt. In den Feldstudien wurden die passiven Exoskelette backX V2 (US Bionics) und Laevo V2.5 eingesetzt. In der Laborstudie kamen die passiven Exoskelette backX V2 und Paexo Back (Ottobock) zum Einsatz.

In Feldstudien wurde der Fragestellung nachgegangen, ob und unter welchen Bedingungen Exoskelette eingesetzt werden könnten. Dazu wurden Vor-Ort-Begehungen zur Erfassung des Status quo operativer Kommissionieraufgaben durchgeführt sowie in Arbeitstagaufnahmen die Belastungssituation körperlicher Arbeit über Anwendung spezieller Screeningverfahren nach dem neuesten Wissensstand analysiert und bewertet, Gefährdungsfaktoren zu Aspekten der Arbeitssicherheit beurteilt und Exoskelette für Haupt- und Nebentätigkeiten typischer Arbeitsschichten erprobt. Zudem wurden die Eignung, Wirksamkeit und Grenzen verschiedener Exoskelettsysteme für die manuelle Kommissionierung bewertet.

Die Datenauswertung des Status quo operativer Kommissionieraufgaben ergab, dass sich die untersuchten Arbeitsplätze entsprechend der vorherrschenden Arbeitssituation zum Teil erheblich voneinander unterscheiden. Neben dem Arbeitsablauf traten besonders Unterschiede in der Lagerstruktur, dem Artikeltransport und den geometrischen Arbeitsbedingungen auf.

Von insgesamt 13 untersuchten Arbeitsplätzen zur Arbeitssicherheit wurden sechs ausgeschlossen, darunter vier wegen zu wenig Bewegungsfreiraum. Unter den 13 Arbeitsplätzen gab es 39 % Gefährdungen ohne Exoskelett. Diese Gefährdungen blieben mit Exoskelett bestehen. Zusätzlich kamen 17 % exoskelettbezogene Gefährdungen hinzu (bspw. verbreiteter Körperbereich, Hängenbleiben wegen Bänder des Exoskeletts). Dabei ist auffällig, dass mechanische Gefährdungen ohne als auch mit Exoskelett am häufigsten vorliegen, gefolgt von physischen Belastungen/Arbeitsschwere.

Die Belastungshöhe war an allen sieben untersuchten Arbeitsplätzen wesentlich erhöht bis hoch, d. h. hinsichtlich des Gesundheitsrisikos ist eine körperliche Überbeanspruchung auch für normal belastbare Personen möglich bis wahrscheinlich, Maßnahmen zur Gestaltung sind erforderlich. Auffällig sind besonders verursachende Merkmale wie Körperhaltung und Lastgewicht. Eine starke Belastung konnte dabei im Nacken und oberen Rücken, Schulter- und Oberarmbereich sowie im unteren Rücken und Hüftbereich festgestellt werden. Der Grund dafür ist das wiederholte Beugen während der Lastaufnahme und die Handhabung hoher Lastgewichte. Es traten die Belastungsarten Heben, Halten und Tragen (HHT), Ziehen und Schieben (ZS) und Ganzkörperkräfte (GK) auf, wobei HHT mit einem Anteil von 82 % vorrangig war. Bei den untersuchten Arbeitsplätzen werden hauptsächlich Artikelgewichte zwischen 5-20 kg (80 %) gehandhabt. Zudem tritt bei einem überwiegenden Teil der Vorgänge eine gebeugte bis stark gebeugte Körperhaltung während der Lastenhandhabung auf.

An den untersuchten Kommissionierarbeitsplätzen lag im Rahmen der Exoskeletterprobung nur ein geringer Grad an Anstrengung und Missempfindung vor. Zum Großteil verbessert sich die subjektive wahrgenommene Anstrengung und Missempfindung der Beschäftigten durch den Exoskeletteinsatz. Insbesondere Beschäftigte mit physischen Beschwerden empfanden eine deutliche Stabilisierung des Muskel-Skelett-Systems. Die Bauweise der passiven Exoskelette bedarf einer Anpassung an längere Bewegungsanteile sowie tiefergelegene Greifpunkte, um deren zielführende Funktion sicherzustellen. Ein rumpfunterstützendes Exoskelett hat – betrachtet über alle Tätigkeiten an den sieben analysierten Kommissionierarbeitsplätzen – bei nur 7 % der Tätigkeiten eine unterstützende Wirkung. Dieser Anteil ist jedoch über die gesamte Schichtzeit verteilt und wird durch andere Tätigkeiten unterbrochen. Die häufigen Unterbrechungen können dazu führen, dass das Erleichterungsempfinden der Nutzer eher gering ist.

Anzumerken ist, dass vor der Einführung von Exoskeletten der Einsatz technischer und organisatorischer Maßnahmen im Vorhinein detailliert zu prüfen und bewerten ist. Sofern darüber hinaus keine weiteren Ausschlusskriterien auftreten, ist eine Erprobung der Exoskelette aus Sicht der Arbeits- und Belastungssituation potenziell möglich. Jedoch muss über eine Gefährdungsbeurteilung ermittelt werden, ob ein Exoskeletteinsatz überhaupt eine deutliche Senkung des Gesundheitsrisikos erbringt. Erst danach kann eine Erprobung der Exoskelette, die lediglich auf Akzeptanz und Beanspruchungsempfinden der Nutzer abzielt, in Betracht gezogen werden. Dazu wurde ein Vorgehen zur Ermittlung einer Risikopunktabsenkung bei Exoskeletteinsatz erarbeitet (Kamusella & Schmauder, 2021).

Zusammengefasst ergaben die Feldstudien, dass ein Exoskeletteinsatz zu keiner ausreichenden Minderung einer gesundheitsgefährdenden Belastungshöhe führt. Daher müssen Unternehmen zusätzliche Gestaltungsmaßnahmen ergreifen. Bei den untersuchten Arbeitstätigkeiten traten erhebliche Anteile der Arbeitszeit mit Nebentätigkeiten auf, in denen ein Exoskelett keine Unterstützungsfunktion bieten würde. Festgestellt wurde, dass technische Maßnahmen noch nicht oder nicht ausreichend ergriffen wurden, deren Potential war nicht ausgeschöpft. Der Einfluss von Exoskeletten auf die Absenkung von Risikopunktwerten kann eher an Übergangsbereichen der Risikokategorien eine Begünstigung zeigen.

Die Laborstudie umfasste zwei Studiendesigns. Im ersten Studiendesign führten Probanden unter Messung der Zeit typische Bewegungen der Kommissioniertätigkeit aus, um die Kommissionierleistung mit und ohne Exoskeletteinsatz zu ermitteln. Im zweiten Studiendesign führten Probanden unter Verwendung einer Motion Capture Technologie typische Bewegungen der Kommissioniertätigkeit aus, um Unterschiede des Bewegungsmusters des menschlichen Körpers mit und ohne Exoskelettanwendung zu identifizieren.

Aus der Analyse der Daten zum Studiendesign 1 ging hervor, dass der Einsatz von Exoskeletten einen signifikanten Einfluss auf die Kommissionierleistung hat- die Leistungsfähigkeit des Kommissionierenden nimmt durch den Einsatz eines Exoskeletts ab und wirkt sich somit negativ auf die Kommissionierleistung aus. Außerdem konnte bestätigt werden, dass die Kommissionierleistung mit steigender Belastung in Bezug auf Körperhaltung und Lastgewicht abnimmt. Ein leistungssteigernder Einfluss des Exoskeletts durch Erhöhung der Belastung durch ein größeres Lastgewicht sowie einer belastenderen Körperhaltung konnte hingegen nicht nachgewiesen werden.

Erste Ergebnisse des Studiendesigns zum Bewegungsmuster zeigten eine Unterstützungsfunktion des Exoskeletts. Während eines Beugevorgangs mit Exoskelett konnte eine stabilisierende Unterstützungsfunktion des Exoskeletts festgestellt werden. Es ließen sich mit Exoskelett keine negativen Effekte auf die Bewegungsmuster erkennen. Stattdessen zeigte sich unter Exoskelettanwendung ein glatterer Bewegungsverlauf.

Als Projektergebnis entstand eine **Handlungsanleitung** (vgl. Anlage digital 1), die Unternehmen bei der Planung des Einsatzes eines passiven Exoskeletts in der Kommissionierung begleitet. Es soll die häufig geübte Praxis von Versuch und Irrtum bei der Einführung der Exoskelettnutzung durch eine systematische Vorgehensweise ablösen. Bereits im Vorfeld der Nutzung sollen die mögliche Entlastungswirkung abgeschätzt und mögliche Grenzen des Einsatzes deutlich werden.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

2.1. Abstimmung mit projektbegleitendem Ausschuss (AP 0) und Vorbereitung der Feldstudien (AP 1)

Zu Beginn fand eine Abstimmung mit den sechs beteiligten Unternehmen zu den zeitlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen für die Feldstudien statt. Anschließend wurden den Unternehmen die Thematik, das Vorgehen der Untersuchungen, die Zielsetzung und die Randbedingungen eines Einsatzes von Exoskeletten, erläutert. Eine Demonstration, der an der Professur für Arbeitswissenschaft vorhandenen Exoskelette wurde durchgeführt.

Zur Vorbereitung der Feldstudien wurden die Unternehmen besichtigt, eine Vorauswahl von Mitarbeitern sowie Arbeitsplätzen mit Kommissioniertätigkeiten, die für eine Untersuchung im Rahmen des Forschungsprojekts geeignet und gleichzeitig für die Unternehmen von Interesse sind, vorgenommen. Weiterhin wurden geeignete Methoden zur

- Erfassung des Status quo operativer Kommissionieraufgaben (Musick, 2020),
- Beurteilung der Belastungssituation körperlicher Arbeit (Stöhr, 2020),
- Gefährdungsbeurteilung der Arbeitssicherheit (Musick, 2020) und
- Erprobung von Exoskeletten (Stöhr, 2020)

ausgewählt und aufbereitet.

2.2. Durchführung der Feldstudien (AP 2)

Abbildung 1 zeigt übersichtlich den Bearbeitungsstand der Feldstudien. Insgesamt waren sieben Unternehmen mit 14 Arbeitsplätzen beteiligt. Grüne Felder zeigen Bearbeitungsschritte, die abgeschlossen und in die Auswertung eingeflossen sind. Graue Felder zeigen Bearbeitungsschritte, die aufgrund von Ausschlusskriterien entfielen und nicht in die Auswertung einfließen.

Arbeitsplatz- Abkürzung	Kommissioniersystem Kommissionieraufgaben	Gefährdungsbeurteilung (ASI)			Ergoanalyse Gesamtdosis	Exoskeletterprobung (Beanspruchung)		
		ohne Exo	Exo 1	Exo 2		ohne Exo	Exo 1	Exo 2
U1								
U1-AP1 (1)								
U1-AP2					kein HHT			
U1-AP3					Bewegungsfläche < 1,5m ²			
U1-AP4					Bewegungsfläche < 1,5m ²			
U2								
U2-AP1 (2)								
U3								
U3-AP1 (3)								
U3-AP2					Bewegungsfläche < 1,5m ²			
U4								
U4-AP1 (4)								
U4-AP2 (5)						analog Kommissionierung-AP		
U4-AP3					Vakuumschlauchheber installiert			
U5								
U5-AP1 (6)								
U6								
U6-AP1 (7)								
U6-AP2					Bewegungsfläche < 1,5m ²			
U7								
U7-AP1	keine Kommissionierung							

Abbildung 1: Übersicht zum Bearbeitungsstand der Feldstudien

Feldstudie A

Zielsetzung

Ermittlung spezifischer Bedingungen in den KMU hinsichtlich

- Tätigkeitsausführung,
- Randbedingungen und
- Belegungsstrategien sowie Systematisierung relevanter Anforderungen und Varianten als Status Quo operativer Aufgaben der Kommissionierung.

Status quo operativer Kommissionieraufgaben

Die Erfassung des Status quo operativer Kommissionieraufgaben wurde an 13 Kommissionierarbeitsplätzen (6 Unternehmen) durchgeführt. Dabei wurde Eigenschaften der Kommissionierstruktur abgefragt (Musick, 2020 in Anlehnung an Hompel et al., 2011; Günther et al. 2014; Walch, 2011; VDI 3590 Blatt 1, 1994). Abbildung 2 zeigt die Auswertung über alle Arbeitsplätze (Senf, 2021). Die bestehenden Arbeitsplatzbedingungen unterscheiden sich sowohl im Kommissionierverfahren, den Arbeitsbedingungen als auch den Artikeleigenschaften.

Bei allen Unternehmen erfolgt die Kommissionierung nach dem Person-zu-Ware-Prinzip. Die Informationsdarstellung unterscheidet sich jedoch abhängig vom Arbeitsplatz und Unternehmen. Bei sieben Arbeitsplätzen wurden die Kommissionierinformationen durch mobile Endgeräte sowie bei fünf Arbeitsplätzen durch Pick-by-Paper bereitgestellt. Ein Arbeitsplatz arbeitet nach dem Pick-by-Voice-Prinzip. Die Artikellagerung ist innerhalb der Unternehmen und unternehmensübergreifend sehr verschieden. Die Artikel werden sowohl einzeln, palettiert in Regalfächern als

auch gebündelt (in Kartonage bzw. Kisten) gelagert. Der Artikeltransport findet bei vier Arbeitsplätzen ausschließlich zu Fuß statt. Bei ebenfalls vier Kommissionierarbeitsplätzen wurde der Artikeltransport durch Verwendung technischer Hilfsmittel realisiert. Bei den übrigen fünf Arbeitsplätzen erfolgte der Transport sowohl zu Fuß als auch durch Transportfahrzeuge. Dabei kamen u. a. Gabelstapler, Regalbediengeräte und Elektro-Ameisen zum Einsatz.

Bei der Analyse des Bewegungsfreiraums während der Artikelentnahme, dem -transport und der -abgabe konnten Unterschiede festgestellt werden. Die Abbildung 2 zeigt die Untersuchungsergebnisse aller Arbeitsplätze bezüglich der Bewegungsfreiheit während des Kommissioniervorgangs. Sofern die Bewegungsfläche $>1,5\text{m}^2$ beträgt, hat der Mitarbeiter trotz des Einsatzes eines Exoskeletts weiterhin eine uneingeschränkte Bewegungsmöglichkeit.

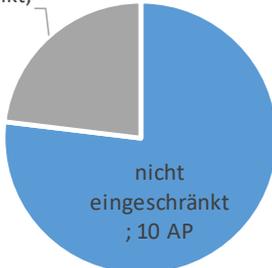
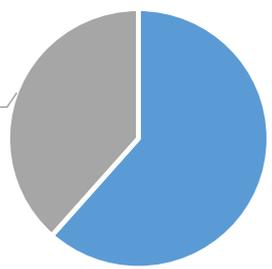
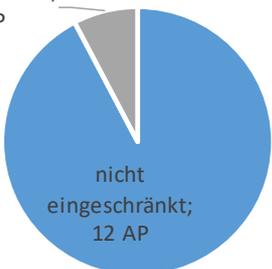
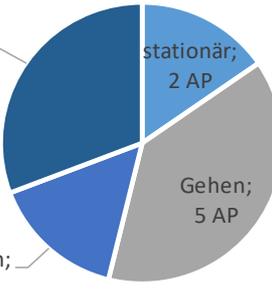
An der Entnahmestelle der Artikel betrug die Bewegungsfläche bei drei Arbeitsplätzen weniger als $1,5\text{m}^2$. Zum einen war die Gangbreite mit $1,05\text{m}^2$ sehr gering, was besonders bei dem Kommissionieren aus unteren Regalfächern zu einer erzwungenen Körperhaltung führte. Des Weiteren wurde direkt aus dem Fahrerhaus kommissioniert, sodass der Bewegungsradius auf die Abmessungen der Fahrerkabine begrenzt ist. An insgesamt fünf Arbeitsplätzen wurde während des Artikeltransports ein geringer Bewegungsraum festgestellt. Der Transport erfolgt überwiegend in der Fahrerkabine ohne gleichzeitiges Halten bzw. Tragen der Artikel. Aus diesem Grund wurden lediglich die Arbeitsplätze von der weiteren Exoskeletterprobung ausgeschlossen, bei denen während Artikelaufnahme und/oder -abgabe eine Bewegungsfläche $<1,5\text{m}^2$ festgestellt wurde.

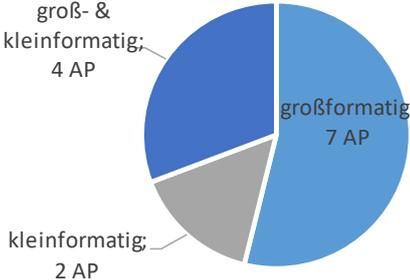
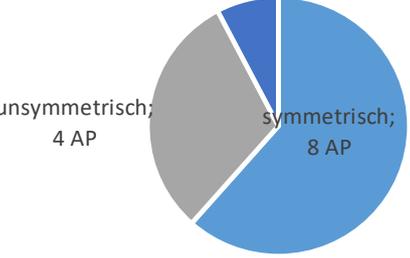
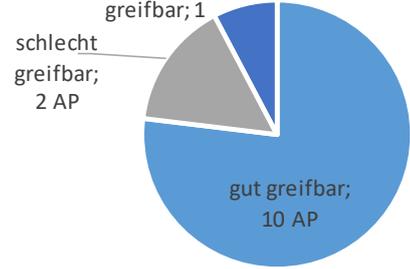
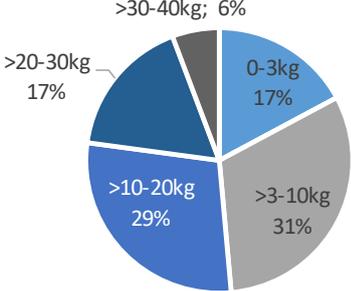
Die Artikeleigenschaften haben erheblichen Einfluss auf die während der Lastenhandhabung eingenommene Körperhaltung und das kommissionierte Lastgewicht. Dabei lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Artikelgröße und -symmetrie und der Handlichkeit der Artikel ableiten. Die Verteilung der Artikeleigenschaften bei den jeweiligen Arbeitsplätzen ist in Abbildung 2 (Artikelgeometrie und Handlichkeit/Greifbarkeit) dargestellt. In der Übersicht wird deutlich, dass großformatige und symmetrische Artikel bei dem Großteil der untersuchten Arbeitsplätze auftraten. Bei zehn Arbeitsplätzen sind die Kommissioniergüter gut greifbar. Bei lediglich zwei Arbeitsplätzen ist keine ausreichend gute Handlichkeit gegeben. Es zeigt sich, dass Artikel, welche eine symmetrische Artikelgeometrie aufweisen, eine deutlich bessere Greifbarkeit und damit eine leichtere Handhabung bieten. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Lastaufnahme und die Körperhaltung, bspw. tritt durch das Greifen unsymmetrischer und großformatiger Artikel häufig eine Rumpfverdrehung bzw. -seitneigung auf. Bei der Untersuchung der Eigenschaft der Greifeinheiten wurde zudem festgestellt, dass die aufgetretenen Lastgewichte hauptsächlich zwischen 3-10kg (32%), $>10\text{-}20\text{kg}$ (32%) und $>20\text{-}30\text{kg}$ (18%) lagen. Eine detailliertere Analyse der Lastgewichte erfolgt in der ergonomischen Gefährdungsbeurteilung (vgl. Kapitel Belastungssituation körperlicher Arbeit).

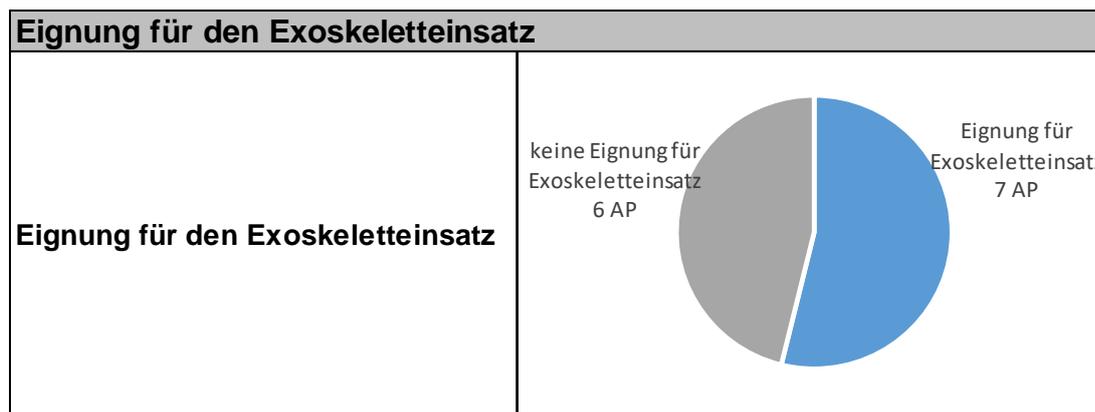
Durch die Analyse der Arbeitsplatzbedingungen konnten bei insgesamt 6 von 13 Arbeitsplätzen Ausschlusskriterien festgestellt werden, für die weitere Untersuchung eines möglichen Exoskeletteinsatzes nicht empfehlenswert ist (vgl. Abbildung 2, Eignung für den Exoskeletteinsatz).

Abbildung 2: Auswertung der Kommissionierstruktur über alle Arbeitsplätze

Kommissionierverfahren									
Kommissionierprinzip	<p>A pie chart illustrating the commissioning principle. The largest segment is 'Person zu Ware' at 93%, and a smaller segment is 'Ware zu Person' at 7%.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Prinzip</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Person zu Ware</td> <td>93%</td> </tr> <tr> <td>Ware zu Person</td> <td>7%</td> </tr> </tbody> </table>	Prinzip	Anteil	Person zu Ware	93%	Ware zu Person	7%		
Prinzip	Anteil								
Person zu Ware	93%								
Ware zu Person	7%								
Informationsbereitstellung	<p>A pie chart showing information provision methods. 'mobile Datenerfassung' accounts for 7 AP, 'Pick-by-Paper' for 5 AP, and 'Pick-by-Voice' for 1 AP.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Informationbereitstellung</th> <th>Anteil (AP)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>mobile Datenerfassung</td> <td>7 AP</td> </tr> <tr> <td>Pick-by-Paper</td> <td>5 AP</td> </tr> <tr> <td>Pick-by-Voice</td> <td>1 AP</td> </tr> </tbody> </table>	Informationbereitstellung	Anteil (AP)	mobile Datenerfassung	7 AP	Pick-by-Paper	5 AP	Pick-by-Voice	1 AP
Informationbereitstellung	Anteil (AP)								
mobile Datenerfassung	7 AP								
Pick-by-Paper	5 AP								
Pick-by-Voice	1 AP								
Artikelstruktur	<p>A pie chart detailing article structure. 'Einzelartikellagerung' is 34%, 'gebündelte Zusammenstellung' is 33%, and 'Artikel palettiert' is 33%.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Artikelstruktur</th> <th>Anteil (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Einzelartikellagerung</td> <td>34%</td> </tr> <tr> <td>gebündelte Zusammenstellung</td> <td>33%</td> </tr> <tr> <td>Artikel palettiert</td> <td>33%</td> </tr> </tbody> </table>	Artikelstruktur	Anteil (%)	Einzelartikellagerung	34%	gebündelte Zusammenstellung	33%	Artikel palettiert	33%
Artikelstruktur	Anteil (%)								
Einzelartikellagerung	34%								
gebündelte Zusammenstellung	33%								
Artikel palettiert	33%								
Artikeltransport	<p>A pie chart showing article transport methods. 'Gehen & Fahren' is 5 AP, 'Gehen' is 4 AP, and 'Fahren' is 4 AP.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Artikeltransport</th> <th>Anteil (AP)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gehen & Fahren</td> <td>5 AP</td> </tr> <tr> <td>Gehen</td> <td>4 AP</td> </tr> <tr> <td>Fahren</td> <td>4 AP</td> </tr> </tbody> </table>	Artikeltransport	Anteil (AP)	Gehen & Fahren	5 AP	Gehen	4 AP	Fahren	4 AP
Artikeltransport	Anteil (AP)								
Gehen & Fahren	5 AP								
Gehen	4 AP								
Fahren	4 AP								

Arbeitsbedingungen	
Bewegungsfreiraum	<p>Entnahmestelle</p>  <p>eingeschränkt; 3 AP</p> <p>nicht eingeschränkt ; 10 AP</p>
	<p>Artikeltransport</p>  <p>eingeschränkt ; 5 AP</p> <p>nicht eingeschränkt; 8 AP</p>
	<p>Abgabestelle</p>  <p>eingeschränkt 1 AP</p> <p>nicht eingeschränkt 12 AP</p>
Sichtbedingungen	 <p>eingeschränkt; 1 AP</p> <p>nicht eingeschränkt; 12 AP</p>
Fortbewegung des Kommissionierers	 <p>Gehen & Fahren; 4 AP</p> <p>stationär; 2 AP</p> <p>Gehen; 5 AP</p> <p>Fahren; 2 AP</p>

Artikeleigenschaften	
Artikelgeometrie	<p style="text-align: center;">Artikelgröße</p>  <p>groß- & kleinformatic; 4 AP</p> <p>kleinformatic; 2 AP</p> <p>großformatig; 7 AP</p>
	<p style="text-align: center;">Artikelsymmetrie</p>  <p>symmetrisch & unsymmetrisch; 1 AP</p> <p>unsymmetrisch; 4 AP</p> <p>symmetrisch; 8 AP</p>
Handlichkeit/Greifbarkeit	<p style="text-align: center;">gut & schlecht greifbar; 1</p>  <p>schlecht greifbar; 2 AP</p> <p>gut greifbar; 10 AP</p>
Häufig aufgetretene Lastgewichte	 <p>>30-40kg; 6%</p> <p>>20-30kg 17%</p> <p>0-3kg 17%</p> <p>>3-10kg 31%</p> <p>>10-20kg 29%</p>



Erarbeitete Ausschlusskriterien zeigen Grenzen für den Exoskeletteinsatz bei manuellen Kommissionieraufgaben

Die Entscheidung über die Eignung eines Arbeitsplatzes für einen möglichen Exoskeletteinsatz basiert auf erarbeiteten Ausschlusskriterien (vgl. Tabelle 1). Es wird unterschieden zwischen generellen Ausschlusskriterien und sicherheitstechnischen Ausschlusskriterien (s. Anlage 1, digital). Die Prüfung auf Ausschlusskriterien erfolgt im Rahmen der Datenerfassung zum Status quo operativer Kommissionieraufgaben (generelle Ausschlusskriterien) und der anschließenden Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit (sicherheitstechnische Ausschlusskriterien). Das Vorliegen eines Ausschlusskriteriums kann zum Ausschluss eines möglichen Exoskeletteinsatzes und damit Abbruch der Arbeitsplatzuntersuchung führen. Können jedoch Maßnahmen realisiert werden, um vorliegende Ausschlusskriterien zu eliminieren, wird die Arbeitsplatzuntersuchung fortgesetzt.

Tabelle 1: Generelle sowie sicherheitstechnische Ausschlusskriterien für einen Exoskeletteinsatz

Generelle Ausschlusskriterien	Sicherheitstechnische Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> • Organisatorische und technische Arbeitsschutzmaßnahmen sind noch nicht ausgeschöpft • Hebe-, Halte- und Tragevorgänge sind nicht vorhanden • Lasten werden überwiegend getragen oder gehalten (kaum Hebevorgänge) • Ausschließlich Lastenhandhabung von Lastgewichten < 3 kg, > 25 kg, auf gleichem Niveau der Lasten oder über Schulterniveau • Lastenmanipulation, jedoch in Form von Körperfortbewegung oder Ziehen und Schieben • Gesamtpunktwert der Leitmerkalmethode HHT < 50 Punkte, also „grüne“ Ampelfarbe • Zusatzlast des Exoskeletts zu hoch für den Nutzer • Nutzer kann Tätigkeiten nicht ohne Exoskeletteinsatz durchführen • Ausschließlich dynamische Tätigkeiten (Kommissionierung im Vorbeigehen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stürzen, Ausrutschen, Stolpern, Umknicken, Hängenbleiben durch eingeschränkten Bewegungsfreiraum $\leq 1,5 \text{ m}^2$ • Riss- oder Schnittverletzungen an Teilen mit gefährlichen Oberflächen • Exoskelett kann von beweglichen Teilen in der Umgebung mitgerissen werden • Beim Tragen des Exoskeletts kann man an Gefahrstellen gelangen und sich dabei verletzen • Exoskelett ist nicht mit dem Arbeitsprozess kompatibel • Kombination von Exoskelett und persönlicher Schutzausrüstung beeinträchtigt sich gegenseitig in ihrer Schutzwirkung • Personen mit Exoskelett können den Fluchtweg nicht benutzen

<ul style="list-style-type: none"> • Häufige Unterbrechung von HHT-Teiltätigkeiten durch andere Vorgänge (z.B.: Fortbewegung ohne Last/ mit Transportmitteln) • Bewertung des Gesundheitsrisikos unter Betracht der Maßnahme Exoskeletteinsatz erbringt keine ausreichende Absenkung von Risikopunktwerten (Exoskeletteinsatz nicht zielführend) 	
--	--

Belastungssituation körperlicher Arbeit

Aufgrund des Ausschlusses von sechs Arbeitsplätzen wurde für sieben Arbeitsplätze jeweils eine Gefährdungsbeurteilung physischer Belastungen nach aktuellen MEGAPHYS-Leitmerkmalmethoden der BAuA (Senf, 2021; Stöhr, 2020 in Anlehnung an BAuA, 2019b) durchgeführt (im Folgenden als Ergonomieanalyse bezeichnet). Die ergonomische Gesamtauswertung im Folgenden erfolgte über alle diese sieben Arbeitsplätze (sechs Unternehmen).

Gesamtbelastung Status quo

Tabelle 2 zeigt den Status quo der Gesamtbelastung der sieben Arbeitsplätze. Die physischen Belastungen der relevanten Belastungsart Heben, Halten und Tragen (HHT) aller sieben untersuchten Arbeitsplätze liegen im mindestens wesentlich erhöhten Bereich (orange bzw. roter Bereich), insbesondere bei Körperhaltung und Lastgewicht (vgl. Abbildung 3), daher ist ein Exoskeletteinsatz nach Einhaltung des TOP-Prinzip eine Option i. S. der Prüfung des Nutzens in einer Belastungsbewertung (Ermittlung der Punktabenkung). Zusätzlich liegen bei sechs Arbeitsplätzen weitere Belastungsarten wie Ziehen und Schieben (ZS) oder Ganzkörperkräfte (GK) vor. Für diese Belastungsarten greift der Exoskeletteinsatz nicht.

Tabelle 2: Gesamtbelastung Status quo der Arbeitsplätze

Arbeitsplatz-Nr.	Physische Belastungsart mit Gesamtpunktwert aus LMM-Multi-E*		
	Heben, Halten und Tragen (HHT)	Ziehen und Schieben (ZS)	Ganzkörperkräfte (GK)
1	134,1		
2	134,2		17,2
3	287,9		58,8
4	65,9	56,1	
5	50,6	42,7	
6	138,6		16,1
7	61,5	44,4	

*LMM-Multi-E (PDF-Formular zur belastungsartspezifischen Zusammenfassung der Beurteilungen mit den Leitmerkmalmethoden über verschiedene Teil-Tätigkeiten eines Arbeitstages)

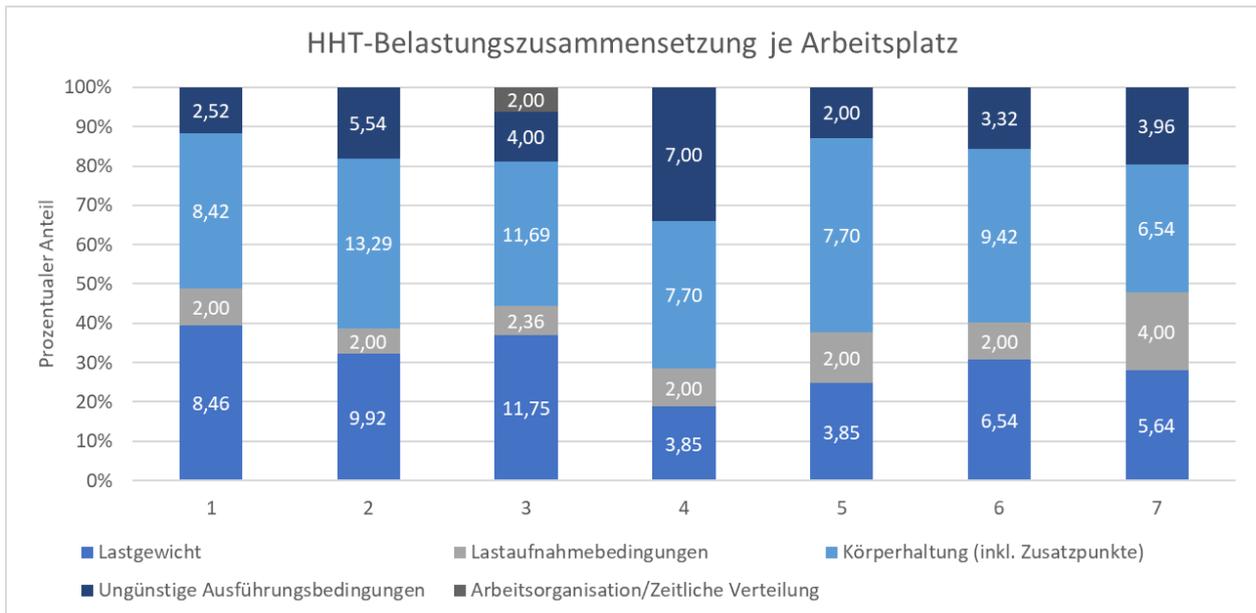


Abbildung 3: Intensität der HHT-Leitmerkmale je Arbeitsplatz

Tabelle 3 zeigt, die Verteilung der aufgetretenen Belastungsarten über alle sieben Arbeitsplätze. Dabei wurden 2424 Hebe-, Halte- und Tragevorgänge erfasst.

Tabelle 3: Verteilung der aufgetretenen Belastungsarten der Arbeitsplätze

Bezeichnung	Anzahl der Vorgänge	Prozentualer Anteil
Heben, Halten u. Tragen (LMM-HHT)	2424	81,7 %
Ganzkörperkräfte (LMM-GK)	313	10,6 %
Ziehen und Schieben (LMM-ZS)	229	7,7 %
Summe	2966	100 %

Belastungsschwerpunkte

Abbildung 4 zeigt die Auswertung der Ergonomieanalysen über alle sieben Arbeitsplätze.

Leitmerkmale - Heben, Halten und Tragen (LMM-HHT)																			
<p>Lastgewicht (für Männer)</p>	<table border="1"> <caption>Lastgewicht (für Männer)</caption> <thead> <tr> <th>Lastgewicht</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>>5-10kg</td> <td>32,4%</td> </tr> <tr> <td>>10-15kg</td> <td>20,0%</td> </tr> <tr> <td>>15-20kg</td> <td>27,4%</td> </tr> <tr> <td>>20-25kg</td> <td>3,2%</td> </tr> <tr> <td>>25-30kg</td> <td>1,5%</td> </tr> <tr> <td>>30-35kg</td> <td>0,3%</td> </tr> <tr> <td>>40kg</td> <td>0,3%</td> </tr> <tr> <td>3-4kg</td> <td>14,9%</td> </tr> </tbody> </table>	Lastgewicht	Anteil	>5-10kg	32,4%	>10-15kg	20,0%	>15-20kg	27,4%	>20-25kg	3,2%	>25-30kg	1,5%	>30-35kg	0,3%	>40kg	0,3%	3-4kg	14,9%
Lastgewicht	Anteil																		
>5-10kg	32,4%																		
>10-15kg	20,0%																		
>15-20kg	27,4%																		
>20-25kg	3,2%																		
>25-30kg	1,5%																		
>30-35kg	0,3%																		
>40kg	0,3%																		
3-4kg	14,9%																		
<p>Lastaufnahmebedingungen</p>	<table border="1"> <caption>Lastaufnahmebedingungen</caption> <thead> <tr> <th>Lastaufnahmebedingungen</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lastaufnahme zeitweilig einhändig und/oder unsymmetrisch, ungleiche Lastverteilung zwischen den Händen (Wichtung - 2)</td> <td>90,4%</td> </tr> <tr> <td>Lastaufnahme überwiegend einhändig oder instabiler Lastschwerpunkt (Wichtung - 4)</td> <td>9,6%</td> </tr> </tbody> </table>	Lastaufnahmebedingungen	Anteil	Lastaufnahme zeitweilig einhändig und/oder unsymmetrisch, ungleiche Lastverteilung zwischen den Händen (Wichtung - 2)	90,4%	Lastaufnahme überwiegend einhändig oder instabiler Lastschwerpunkt (Wichtung - 4)	9,6%												
Lastaufnahmebedingungen	Anteil																		
Lastaufnahme zeitweilig einhändig und/oder unsymmetrisch, ungleiche Lastverteilung zwischen den Händen (Wichtung - 2)	90,4%																		
Lastaufnahme überwiegend einhändig oder instabiler Lastschwerpunkt (Wichtung - 4)	9,6%																		
<p>Körperhaltung (inklusive Zusatzbelastung)</p>	<table border="1"> <caption>Körperhaltung (inklusive Zusatzbelastung) - KH</caption> <thead> <tr> <th>KH</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>KH-0</td> <td>5,7%</td> </tr> <tr> <td>KH-3</td> <td>22,1%</td> </tr> <tr> <td>KH-5</td> <td>37,5%</td> </tr> <tr> <td>KH-7</td> <td>11,7%</td> </tr> <tr> <td>KH-9</td> <td>1,2%</td> </tr> <tr> <td>KH-10</td> <td>17,7%</td> </tr> <tr> <td>KH-15</td> <td>4,1%</td> </tr> </tbody> </table>	KH	Anteil	KH-0	5,7%	KH-3	22,1%	KH-5	37,5%	KH-7	11,7%	KH-9	1,2%	KH-10	17,7%	KH-15	4,1%		
	KH	Anteil																	
KH-0	5,7%																		
KH-3	22,1%																		
KH-5	37,5%																		
KH-7	11,7%																		
KH-9	1,2%																		
KH-10	17,7%																		
KH-15	4,1%																		
<table border="1"> <caption>Körperhaltung (inklusive Zusatzbelastung) - Zusatzbelastung</caption> <thead> <tr> <th>Zusatzbelastung</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>keine Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP = 0)</td> <td>20,3%</td> </tr> <tr> <td>erhöhte Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP ≥ 3)</td> <td>75,0%</td> </tr> <tr> <td>geringe Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP < 3)</td> <td>4,6%</td> </tr> </tbody> </table>	Zusatzbelastung	Anteil	keine Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP = 0)	20,3%	erhöhte Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP ≥ 3)	75,0%	geringe Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP < 3)	4,6%											
Zusatzbelastung	Anteil																		
keine Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP = 0)	20,3%																		
erhöhte Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP ≥ 3)	75,0%																		
geringe Zusatzbelastung der Körperhaltung (ΣZP < 3)	4,6%																		

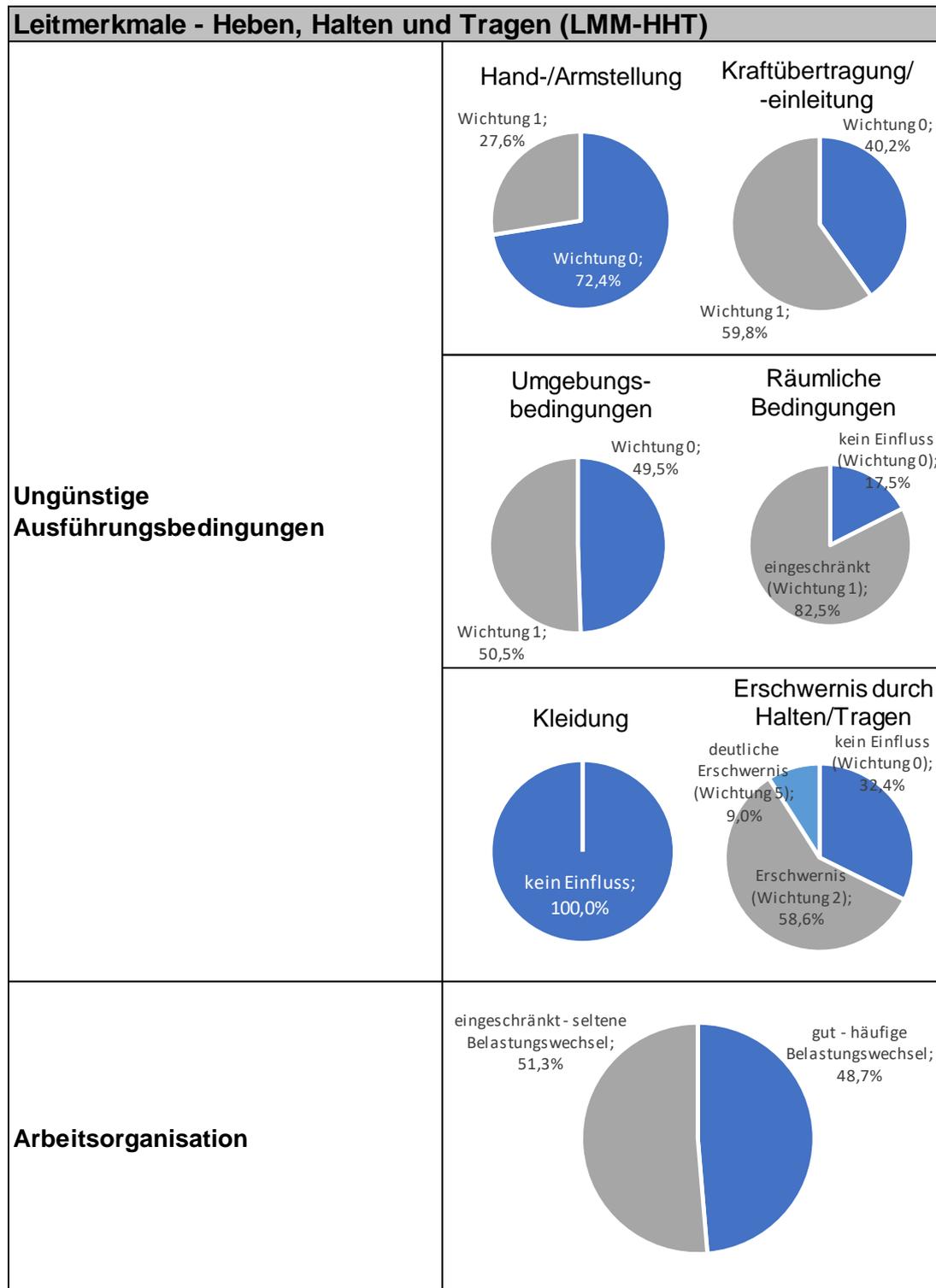


Abbildung 4: Auswertung der Ergonomieanalysen über alle sieben Arbeitsplätze

Belastungsschwerpunkt: Lastgewicht

- Belastungsschwerpunkte: 5-20 kg → Anteil über ¾ aller Lastklassen
- 2 % aller Tragevorgänge mit Lasten über 25 kg → **Exoskletteinsatz ungeeignet, da herstellerseitige Begrenzung der Unterstützungswirkung**

Belastungsschwerpunkt: Körperhaltung

- Belastungsschwerpunkte: gebeugte, teilweise stark gebeugte Körperhaltung → Körperhaltungen 3, 5, 7, 10 (vgl. Abbildung 5)
- bei 1/3 der Schicht haben die Beschäftigten ein **kritische** bis **sehr kritische** Körperhaltung, da stark gebeugte Aufnahme und Abgabe der Last → Körperhaltungen 7,10

Start / Ziel	Ziel / Start	Wichtung	Start / Ziel	Ziel / Start	Wichtung
		0			10 ³⁾
		3			13 ³⁾
		5			15 ³⁾
		7			18 ³⁾
		9 ³⁾			20 ³⁾

Abbildung 5: Darstellung der Körperhaltungen (BAuA, 2019b)

- bei knapp **95 %** mindestens einmal gebeugte Körperhaltung, also bei **Abgabe oder Entnahme** (vgl. Abbildung 6)
- nur **5 %** der Vorgänge an den Arbeitsplätzen haben eine **aufrechte** Körperhaltung

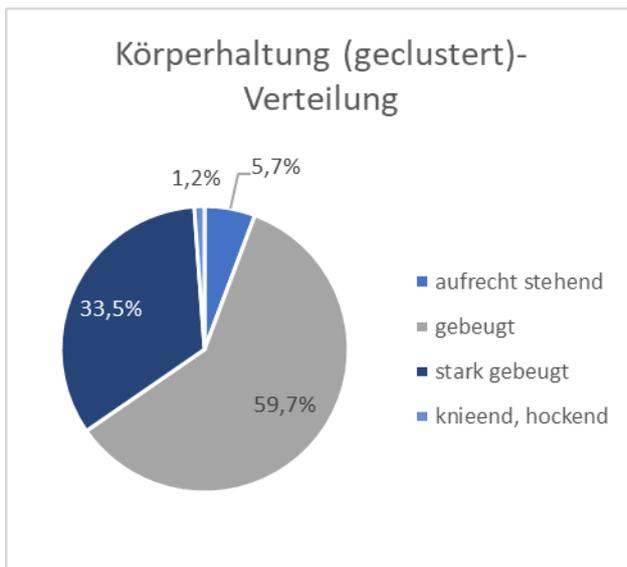


Abbildung 6: Verteilung der Körperhaltung (geclustert) über alle sieben Arbeitsplätze

Knapp 80 % der HHT-Vorgänge der Arbeitsplätze haben zusätzlich noch **Zusatzbelastungen** wie (vgl. Abbildung 4, Körperhaltung):

- Rumpfvordrehung
- Last körperfern
- Arme angehoben
- Hände über Schulter

Belastung durch Lastaufnahmebedingungen

An keinem Arbeitsplatz der untersuchten Unternehmen lagen ideale Lastaufnahmebedingungen vor.

- **90 %** Lastaufnahme zeitweilig einhändig und/ oder unsymmetrisch, oder ungleiche Lastverteilung zwischen den Händen (vgl. Abbildung 4, Lastaufnahmebedingungen)
- bei 10% der Tätigkeiten erfolgt die Lastaufnahme einhändig und instabil

Belastung durch ungünstige Ausführungsbedingungen

Räumliche Bedingungen:

Es traten 82 % Einschränkungen auf (häufig Bewegungsfreiraum < 1,5 m² oder Durchgang zu eng). **Dies ist problematisch bei einem Exoskeletteinsatz.**

Erschwernis durch Halten/Tragen:

- 58 % der Arbeitsplätze haben zusätzlich zum Heben der Last ein **Halten und Tragen bis 5 m**
 - bei weiteren 9 % der Arbeitsplätze werden sogar **Wege von 5 bis 10 m** mit Last zurückgelegt
- Hierbei wird zusätzlich zum Lastgewicht das Exoskelett am Körper getragen (3-5 kg), wobei es bei der Körperfortbewegung keine Unterstützungswirkung hat, sondern eher belastungsverstärkend wirkt.

Unrelevant im Kontext eines möglichen Exoskeletteinsatzes:

- Hand-/Armstellung (27 % gelegentlich eingeschränkt)
- Kraftübertragung/ -einleitung (59 % eingeschränkt)
- Umgebungsbedingungen (50 % eingeschränkt)
- Kleidung (0 % eingeschränkt)

Belastung durch Arbeitsorganisation

- 49 % der Arbeitsplätze haben eine **gute Arbeitsorganisation** → keine enge Abfolge der Belastung, sondern es ist ein häufiger Wechsel durch andere Belastungsarten gegeben
- 51 % der Arbeitsplätze haben **eingeschränkte** Bedingungen hinsichtlich Belastungswechsel → enge Abfolge belastender Tätigkeiten und selten Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten (mit anderen Belastungsarten):
 - Beschäftigte haben einen gewissen Belastungswechsel durch Nebentätigkeiten, diese haben aber auch Belastungen: **bspw. trat bei 18% der Tätigkeiten Ziehen und Schieben oder Ganzkörperkräfte auf** → es werden ähnliche Skelett- und Muskelstrukturen beansprucht

- **Restliche Nebentätigkeiten sind positiv** (Laufen, Gabelstapler/ Ameise fahren, Administratives), da andere Skelett- und Muskelstrukturen beansprucht werden → im Sinne des Belastungswechsels

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Abfolge belastungsrelevanter Tätigkeiten gegenüber anderen Tätigkeitsanteilen **nicht homogen/kompakt**, sondern ungleich verteilt ist → **Problematisch bei Exoskeletteinsatz**

Zusammenfassung – Ursachen von Belastungen

Die physische Belastung von Beschäftigten in der Kommissionierung resultiert hauptsächlich aus

- dem hohen **Artikelgewicht**,
- schlechter **Körperhaltung** wegen geometrisch ungünstigen Bedingungen der Entnahme- und Abgabestelle (bspw. von Regal oder Palette),
- des **Zeitdrucks** wegen der hohen Anzahl an Kommissionierpositionen,
- dem **manuellen Tragen** der Artikel anstatt der Verwendung technischer Hilfsmittel,
- keine Griffmöglichkeit an den Artikeln
- unsymmetrische Artikelgeometrie mit ungleicher Lastverteilung,
- eingeschränkter Bewegungsfreiraum,
- Lastenhandhabung über Schulter- und Kopfniveau,
- Entnahme mehrerer Artikel gleichzeitig aus Regalfach,
- einhändige Lastenhandhabung,
- große Weglängen zu Fuß und
- keine wegoptimierte Routenplanung.

Tätigkeitsverteilung und Anteil relevanter Tätigkeiten für Exoskeletteinsatz

An dieser Stelle wird auf die Tätigkeitsverteilung hingewiesen (vgl. Abbildung 7). Unter allen Tätigkeiten der analysierten Arbeitsplätze waren **nur 21 % für einen möglichen Exoskeletteinsatz relevant** (relevante HHT-Tätigkeiten). Für 79 % aller Tätigkeiten entfällt eine Exoskelettunterstützung, da Ausschlusskriterien greifen (kein manuelles Heben, Lasten > 25 kg, s. Abbildung 7).

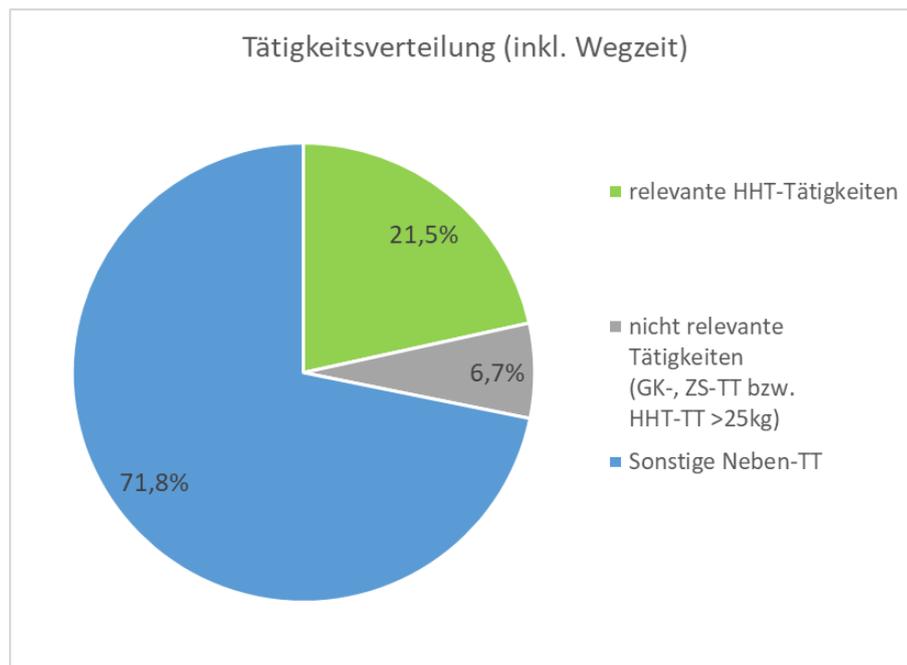


Abbildung 7: Tätigkeitsverteilung (inkl. Wegzeit) über alle sieben Arbeitsplätze

Innerhalb der 21 % relevanten HHT-Tätigkeiten waren 67% Tätigkeiten, bei denen ein Exoskelett nicht wirkt (vgl. Abbildung 8). Das betrifft das Tragen auf gleichbleibender Höhe sowie das Absenken der Last. Unter den 21 % der relevanten HHT-Tätigkeiten findet bei 33 % ein Anheben statt. Hierbei wirkt das Exoskelett unterstützend. **Bei 1/3 aller relevanten HHT-Vorgänge (HHT-Vorgänge \leq 25 kg) unterstützt das Exoskelett tatsächlich.**

Somit hat ein rumpfunterstützendes **Exoskelett – betrachtet über alle Tätigkeiten an den sieben analysierten Kommissionierarbeitsplätzen – bei nur 7 % der Tätigkeiten eine unterstützende Wirkung** (33 % Anheben von 21 % relevanten HHT-Tätigkeiten). Bei 1,7 % wird durch das Exoskelett besonders gut entlastet (8 % Tief -> Aufrecht von 21 % relevanten HHT-Tätigkeiten).

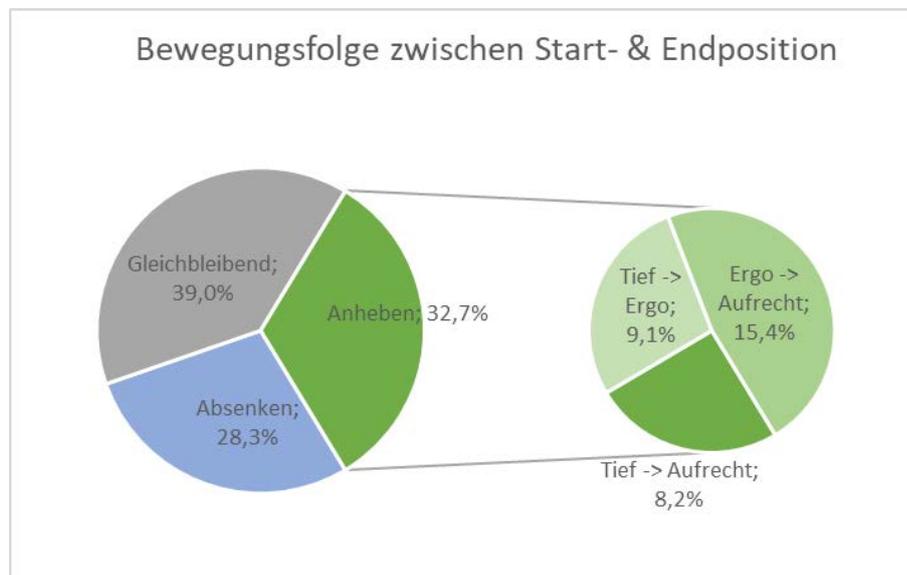


Abbildung 8: Bewegungsfolge zwischen Start- und Endposition

Feldstudie B

Zielsetzung

Erprobung und Beurteilung der grundsätzlichen Eignung verschiedener Exoskelette für typische Kommissionieraufgaben in den KMU hinsichtlich

- Ausführbarkeit,
- Schädigungslosigkeit und
- Zumutbarkeit der Tätigkeit.

Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit ohne und mit Exoskelett

Die Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit wurde für alle 13 Kommissionierarbeitsplätze in den sieben Partnerunternehmen durchgeführt (Musick, 2020 in Anlehnung an BGHW, 2018; Unfallkasse Hessen, 2013; BAuA, 2019a; Institut der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2019). Sie war der Ergonomieanalyse vorgelagert und diente dazu, Ausschlusskriterien zu identifizieren (Petko, 2021). Vier Arbeitsplätze wurden ausgeschlossen, weil zu wenig Bewegungsfreiraum verfügbar war. Ein weiterer verfügte bereits über einen Vakuumschlauchheber. Ein sechster Arbeitsplatz wurde ausgeschlossen, da keine Lasten manuell gehoben worden. Damit verblieben für die weiteren Analysen sieben Arbeitsplätze.

Tabelle 4 zeigt die Gefährdungssituation über alle 13 Kommissionierarbeitsplätze. Ab **mittleres Risiko besteht** grundsätzlich Handlungsbedarf.

- Analyse von 54 Gefährdungen gemäß Handbuch Gefährdungsfaktoren der BAuA (2019a) ohne Exoskeletteinsatz am Arbeitsplatz
- Unter Exoskeletteinsatz zusätzlich Analyse von 65 exoskelettbezogenen Gefährdungen am Arbeitsplatz „nur Exo“ (Analyseergebnis der 54 Gefährdungen ohne Exoskelett war auch mit Exoskelett immer das gleiche)
- Analyseergebnis für Laevo und backX immer gleich

Tabelle 4: Gefährdungssituation über alle 13 Kommissionierarbeitsplätze

Gefährdungssituation über alle 13 Kommissionierarbeitsplätze	geringes Risiko		mittleres Risiko		Risiko	
	ohne Exoskelett	mit Exoskelett	ohne Exoskelett	mit Exoskelett	ohne Exoskelett	mit Exoskelett
	Anzahl der Gefährdungen*					
über alle Unternehmen	162	231	62	134	8	28

*Maximal mögliche Anzahl an Gefährdungen: ohne Exoskelett: 702 = 54 Kriterien x 13 Arbeitsplätze; mit Exoskelett: 1547 = 119 Kriterien x 13 Arbeitsplätze

Abbildung 9 zeigt die Auswertung der Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit über alle 13 Kommissionierarbeitsplätze:

Gefährdungen:

- 39% Gefährdungen ohne Exoskelett
- mit Exoskelett kamen 17 % exoskelettbezogene Gefährdungen hinzu, da zusätzlich exoskelettbezogene Kriterien abgefragt wurden (bspw. verbreiteter Körperbereich, hängenbleiben wegen Bänder des Exoskeletts)

Handlungsbedarf:

→ allgemein ist ein Handlungsbedarf vorhanden, jedoch marginaler Anteil

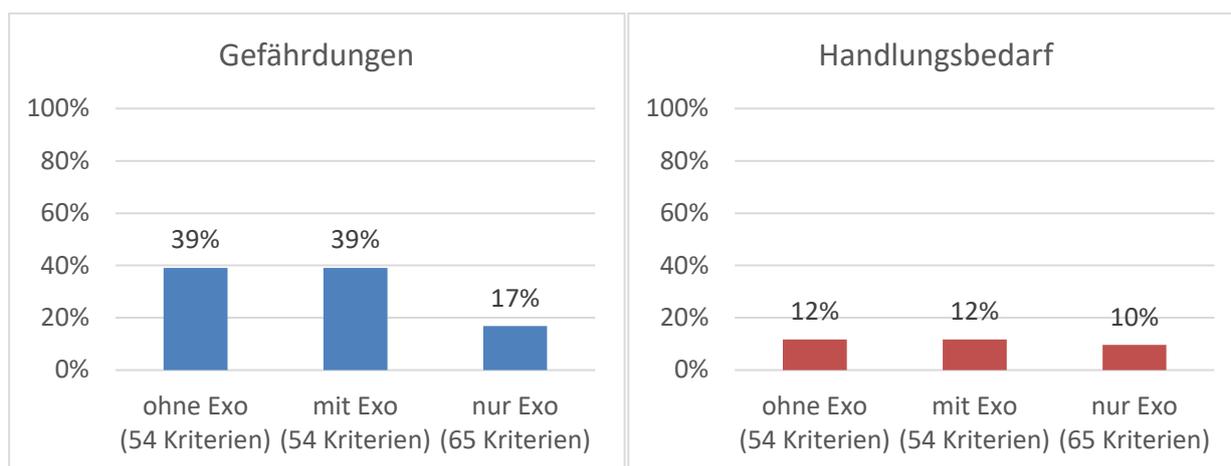


Abbildung 9: Auswertung der Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit über alle 13 Kommissionierarbeitsplätze

Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Gefährdungen ohne und mit Exoskelett über die sechs Gefährdungsklassen. Dabei ist auffällig, dass mechanische Gefährdungen ohne als auch mit Exoskelett am häufigsten vorliegen, gefolgt von physischen Belastungen/Arbeitsschwere.

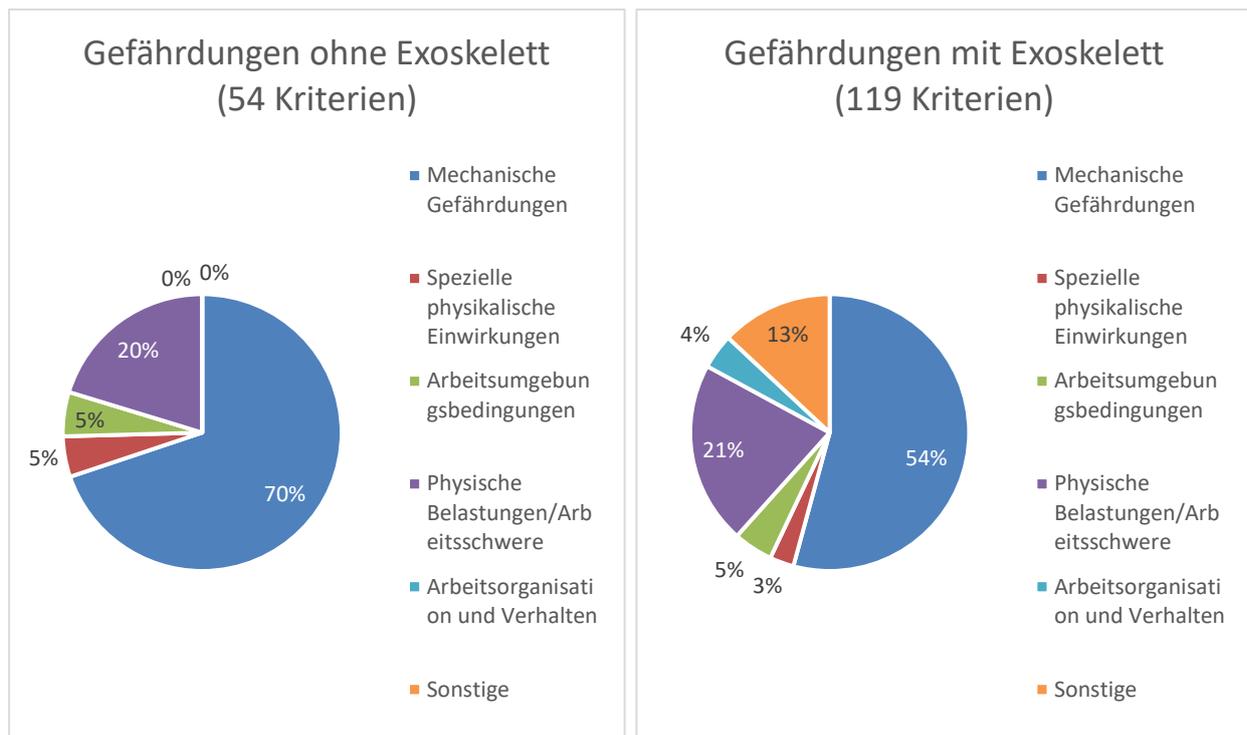


Abbildung 10: Verteilung der Gefährdungen ohne und mit Exoskelett über die sechs Gefährdungsklassen.

Ergebnisse:

- sieben Arbeitsplätze wiesen **keine Gefährdungen** auf, die einen Exoskeletteinsatz aus Perspektive der Arbeitssicherheit ausschließen
- sechs Arbeitsplätze wurden durch Ausschlusskriterien für weitere Analysen **ausgegrenzt**
- Bauartbezogen (backX V2 / Laevo V2.5) **keine Unterschiede** in der Gefährdungsbeurteilung

Erprobung von Exoskeletten

Beanspruchungsbefragung zu Anstrengung und Missempfindung

Es folgte die Erprobung rumpfunterstützender Exoskelette an den sieben Arbeitsplätzen, wo zuvor eine mindestens wesentlich erhöhte physische Belastung festgestellt wurde (mit jeweils drei Probanden) und kein Ausschlusskriterium festgestellt wurde (Petko, 2021). Zusätzlich wurde an einem Arbeitsplatz eines weiteren Unternehmens die Exoskeletterprobung durchgeführt (nur ein Proband).

Abbildung 11 veranschaulicht, dass knapp die Hälfte der Probanden bereits vorhandene physische Beschwerden hatte. Knapp 90 % der Probanden sind technikaffin.

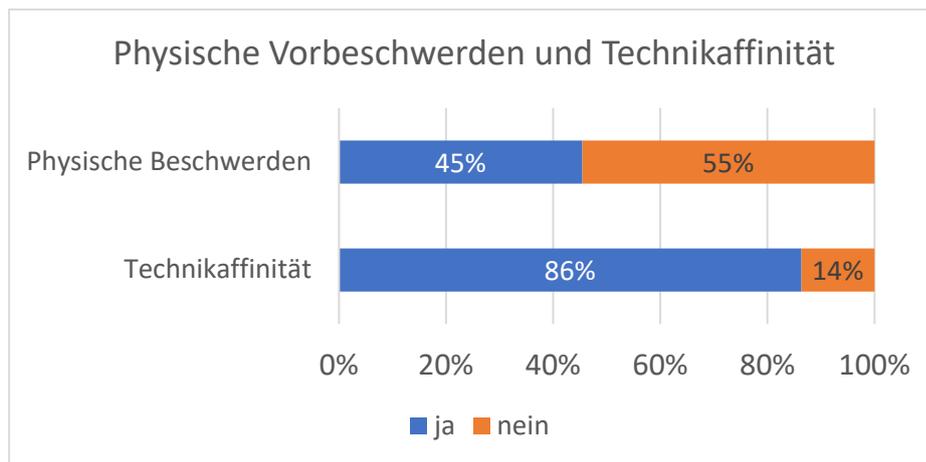


Abbildung 11: Anteil der Probanden mit vorhandenen physischen Beschwerden bzw. Technikaffinität

Die Beanspruchungsbefragung zu Anstrengung und Missempfindung während der Exoskeletterprobung erfolgt unter Verwendung einer modifizierten Borg-Skala (Stöhr, 2020 in Anlehnung an Kamusella & Schmauder, 2019; Kamusella & Hoske, 2018). Dabei reicht der Grad der Anstrengung bzw. Missempfindung von 0 für „nicht anstrengend“ bzw. „keine Schmerzen“ bis 4 für „sehr anstrengend“ bzw. „unerträgliche Schmerzen“ (vgl. Anlage digital 1). Die Beanspruchungsbefragung wurde jeweils ohne Exoskeletteinsatz, mit Einsatz des Laevo V2.5 sowie des backX V2 in 15-minütigen Zeitintervallen über 405 min pro Tag durchgeführt. Abbildung 12 veranschaulicht die Summe der Anstrengung und Missempfindung der 22 Probanden (acht Arbeitsplätze, sieben Unternehmen) während der 405 analysierten Minuten. Sowohl die summierte wahrgenommene Anstrengung als auch die summierte wahrgenommene Missempfindung der 22 Probanden ist mit beiden Exoskeletten geringer als ohne Exoskeletteinsatz. Die Beanspruchungsbefragung zeigt, dass eine Verbesserung der Anstrengung und Missempfindung durch den Exoskeletteinsatz eintritt. Es zeigte sich auch, dass besonders Beschäftigte mit bereits vorhandenen physischen Beschwerden eine Stabilisierung des Muskel-Skelett-Systems empfanden.

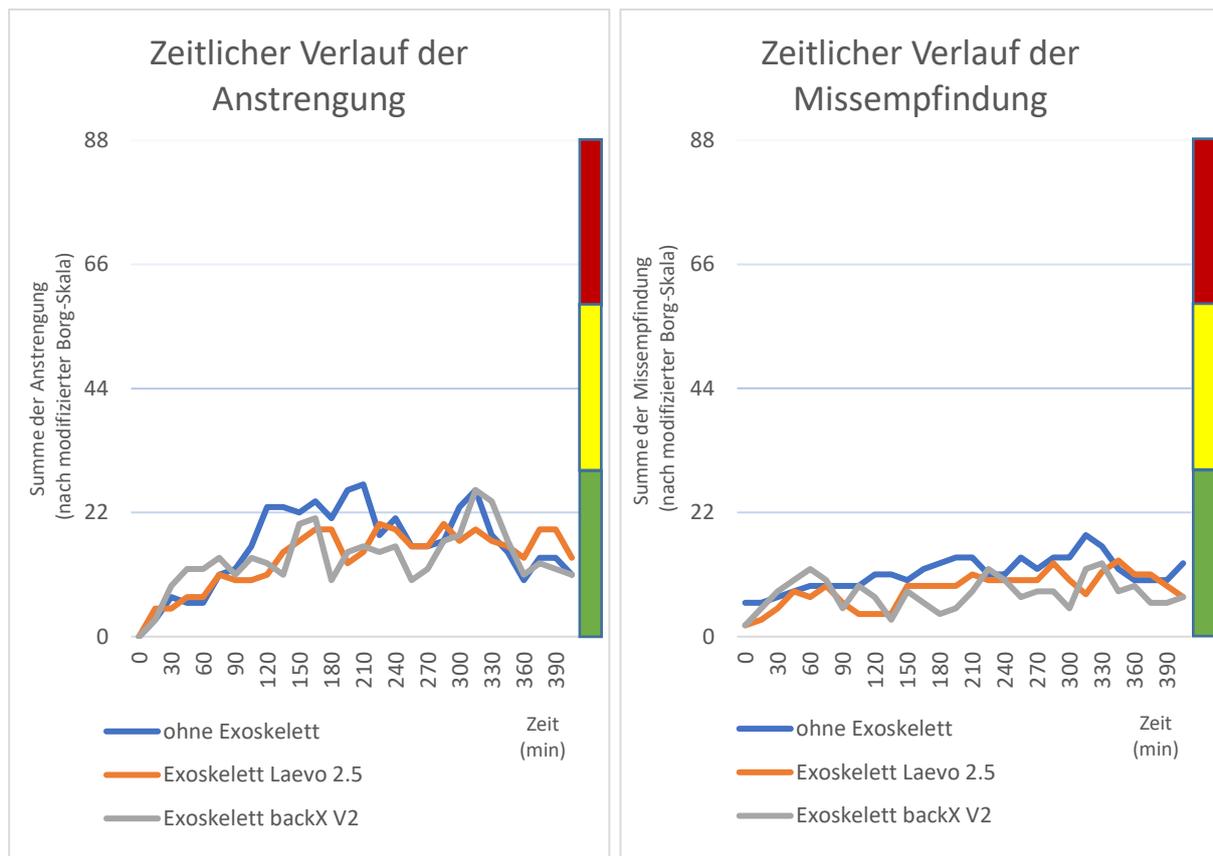


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der Anstrengung und Misempfindung - Summe der 22 Probanden

Die Misempfindung wurde für einzelne **Körperbereiche** (Nacken, Oberarme, Brustbereich, Bereich Lendenwirbelsäule, Hüftgelenk, Oberschenkel, Kniegelenke, Fußgelenke) abgefragt. Beanspruchungseffekte waren:

- Hälfte der Probanden haben durch das Exoskelett eine Misempfindung im Brustbereich wahrgenommen (Brustpad der Exoskelette drückt, insb. bei Laevo)
- Mehrheit der Probanden nimmt eine Entlastung der Lendenwirbelsäule durch das Exoskelett wahr
- Knapp die Hälfte der Probanden weisen durch das Exoskelett eine Misempfindung im Oberschenkel auf (Oberbeinschalen der Exos drücken auf die Oberschenkel)

Einfluss auf Belastungsmerkmale durch Exoskeletteinsatz

Abbildung 13 zeigt die Belastungsmerkmale der LMM-HHT auf, deren Belastungspunkteabbau überprüft werden kann (vgl. Kamusella & Schmauder, 2021). Grün und Rot hervorgehoben sind Merkmale, die sich prinzipiell durch einen Exoskeletteinsatz beeinflussen lassen.

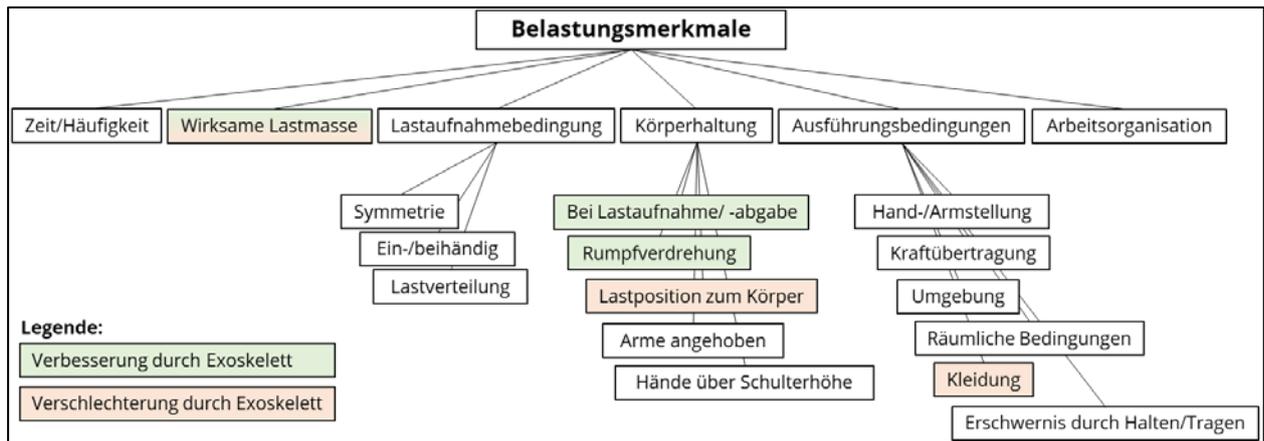


Abbildung 13: Belastungsmerkmale der LMM-HHT, die durch einen Exoskeletteinsatz beeinflusst werden (in Anlehnung an Kamusella & Schmauder, 2021)

Die Exoskeletterprobung an den sieben Arbeitsplätzen zeigt, wo ein Exoskelett wirkt:

- bei Lastgewicht (Verbesserung)
- Körperhaltung (Verbesserung)
- Rumpfverdrehung (Verbesserung, da weniger verdreht)
- Lastposition (Verschlechterung, da körperferner)
- Kleidung (Verschlechterung durch Gewicht der Ausrüstung)

→ Der Exoskeletteinsatz führt jedoch nicht zu ausreichendem Punkteabbau, sondern nur zu einer marginalen Veränderung der Beanspruchung, der Punktwert des Gesundheitsrisikos bleibt im gleichen Risikobereich.

Schlussbefragung zur Akzeptanz der erprobten Exoskelette

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der Schlussbefragung zur Akzeptanz der erprobten Exoskelette. Am Ende jedes Tages der Exoskeletterprobung mit Laevo oder backX wurde jeder Proband befragt. Die **Interpretation** der Antworten auf die vier Fragen (vgl. Abbildung 14) ist wie folgt:

1) Es ist vorstellbar, das Exoskelett täglich in den Arbeitsablauf zu integrieren.

- fast 3/4 Ablehnung → viele Unterbrechungen z.B.: durch Tätigkeiten mit Gabelstapler/ Ameise
- Exoskelett unterstützt nur beim Heben → Exoskelett bietet sich dann an, wenn am Stück eine Zeit lang nur Hebetätigkeiten durchgeführt werden

2) Es werden Einschränkungen des Bewegungsapparats beim Tragen des Exoskeletts empfunden.

- 2/3 stimmt dem zu → Einschränkungen weniger, wenn das Exoskelett sich beim Laufen automatisch deaktiviert (z.B.: backX)
- Einschränkungen weniger, wenn Beinschalen, Brustpad gut gepolstert sind und gut aufliegt (z.B.: backX)

3) Es wird eine spürbare Erleichterung der Arbeit durch das Tragen des Exoskeletts empfunden.

- Die Hälfte der Beschäftigten stimmt dem zu
- Subjektiv empfundene Erleichterung nur beim Heben (Hebeanteil)

4) Das Eigengewicht des Exoskeletts wird als zu hoch empfunden.

- 78% der Probanden spürt das Eigengewicht kaum, da Exoskelett eng am Körper anliegt

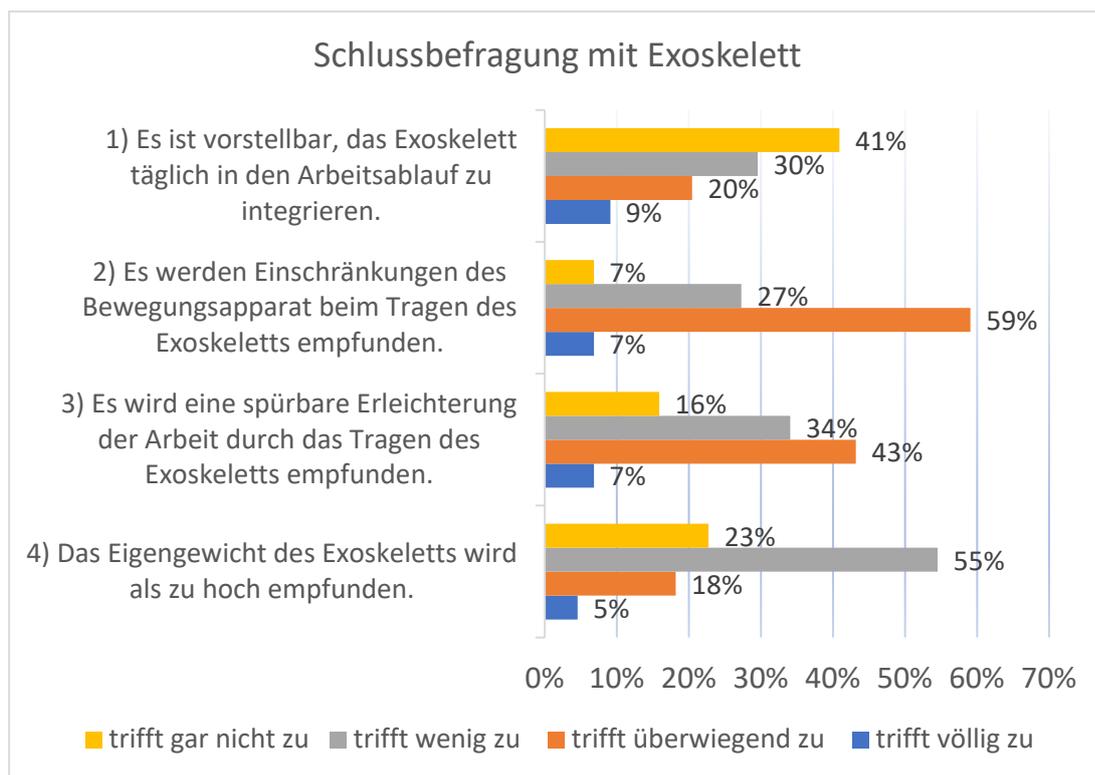


Abbildung 14: Ergebnis der Schlussbefragung zur Akzeptanz der erprobten Exoskelette

2.3. Durchführung der Laborstudien (AP 3) und Analyse und Aufbereitung der Messdaten (AP 4)

Anhand der Erkenntnisse aus AP 2 fand eine Konzeption der Tätigkeiten in Art und Umfang statt. Ebenfalls fand eine Festlegung zweier Studiendesigns statt (s. Promotionsvorhaben Kreil 2022 und Stöhr 2022). Endergebnisse werden mit der Dissertationsschrift veröffentlicht.

Studiendesign 1: Einfluss eines passiven rumpfunterstützenden Exoskeletts auf die Kommissionierleistung

Vorbereitung

Für das Studiendesign 1 wurden Vorversuche durchgeführt. In dieser Vorbereitungszeit wurden Versuchsstände konzipiert, verschiedene Expositionen mit Versuchspersonen getestet, geeignete Normalisierungsübungen zur Findung einer Referenz gesucht und Zeitmessverfahren getestet. Die Ergebnisse der Vorversuche flossen in das finale Versuchsdesign ein.

Versuchsdesign

Konstruktion eines repräsentativen Versuchsstands in Laborumgebung

Die Versuchskonzeption erfolgte nach Ausprägung der Belastungsmerkmale gemäß dem Speziellen Screeningverfahren Leitmerkmalmethode der BAuA für die Belastungsart Heben, Halten, und Tragen (LMM-HHT). Das Verfahren dient dazu das Gesundheitsrisiko in Abhängigkeit von

der Belastungshöhe verschiedener Merkmale zu bestimmen. Dabei werden die für die Kommissioniertätigkeit und für den Exoskeletteinsatz typischen Belastungsmerkmale als Parameter ausgewählt. Diese sind neben dem Parameter Exoskelett sowohl die Körperhaltung als auch die Lastmasse. In 16 Expositionen (vgl. Tabelle 5) wurden zwei verschiedene Lastmassen (Lastmasse 1: 7,5 kg, Lastmasse 2: 12,5 kg) aus zwei Lastklassen des Speziellen Screeningverfahrens Leitmerkmalmethode sowie drei verschiedene Körperhaltungen untersucht (vgl. Abbildung 15).

Tabelle 5: Übersicht Expositionen Studiendesign 1

Belastungsfall	Bezeichnung	Körperhaltung	Lastmasse	Häufigkeit	Exoskelett	Zeitmessungsrunden
1	E1	KH1	LM1	336	ohne Exo	112
2	E2	KH1	LM2	252	ohne Exo	84
3	E3	KH2	LM1	126	ohne Exo	42
4	E4	KH2	LM2	111	ohne Exo	37
5	E5	KH3	LM1	225	ohne Exo	75
6	E6	KH3	LM2	174	ohne Exo	58
7	E7	KH1	LM1	42	ohne Exo	14
		KH2	LM1	42		14
		KH1	LM1	42		14
		KH2	LM1	42		14
				168		56
8	E8	KH1	LM2	33	ohne Exo	11
		KH2	LM2	33		11
		KH1	LM2	33		11
		KH2	LM2	33		11
				132		44
9	E9	KH1	LM1	336	mit Exo	112
10	E10	KH1	LM2	252	mit Exo	84
11	E11	KH2	LM1	126	mit Exo	42
12	E12	KH2	LM2	111	mit Exo	37
13	E13	KH3	LM1	225	mit Exo	75
14	E14	KH3	LM2	174	mit Exo	58
15	E15	KH1	LM1	42	mit Exo	14
		KH2	LM1	42		14
		KH1	LM1	42		14
		KH2	LM1	42		14
				168		56
16	E16	KH1	LM2	33	mit Exo	11
		KH2	LM2	33		11
		KH1	LM2	33		11
		KH2	LM2	33		11
				132		44

Die Wiederholungszahl an Hebevorgängen (Häufigkeit) wurde so angepasst, dass alle Expositionen gemäß einer Beurteilung der Belastungshöhe mit speziellem Screening-Verfahren Leitmerkmalmethode der BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) die gleiche Belastung aufweisen. Die Belastung aller Expositionen liegt im wesentlich erhöhten Bereich der

Belastungsampel und rechtfertigt somit den Einsatz des Exoskeletts. Alle Expositionen wurden in randomisierter Reihenfolge durchgeführt.

Wirksame Lastmassen (LM)					
Wirksame Lastmasse 1 (LM1): >5 – 10 kg			Wirksame Lastmasse 1 (LM2): >10 – 15 kg		
Körperhaltungen (KH)					
Körperhaltung 1 (KH1)		Körperhaltung 2 (KH2)		Körperhaltung 3 (KH3)	
Entnahme	Abgabe	Entnahme	Abgabe	Entnahme	Abgabe
Merkmale:		Merkmale:		Merkmale:	
<ul style="list-style-type: none"> • beidhändige und körpernahe Entnahme und Abgabe der Behälter • Entnahme aufrecht • Abgabe nach vorn gebeugt 		<ul style="list-style-type: none"> • beidhändige und körpernahe Entnahme und Abgabe der Behälter • Entnahme nach vorn gebeugt • Abgabe nach vorn gebeugt 		<ul style="list-style-type: none"> • beidhändige und körpernahe Entnahme und Abgabe der Behälter • Entnahme aufrecht mit seitlicher Rumpfverdruehung • Abgabe nach vorn gebeugt 	

Abbildung 15: Belastungsmerkmale Studiendesign 1

Versuchsaufbau

Als Grundlage für den Versuchsaufbau dienten drei Schwerlastregale, welche in Form eines Dreiecks im Laborraum positioniert wurden. Der Versuchsaufbau spiegelt dabei die Kommissionierumgebung eines „Person zur Waren“-Systems wider. Mithilfe der Versuchsanordnung wird eine eindimensionale Fortbewegung des Kommissionierenden simuliert. Alle stattfindenden Tätigkeiten, d. h. Entnahme, Transport und Abgabe, werden manuell ausgeführt. Für die Untersuchung des Einflusses bei der Verwendung eines Exoskeletts auf die Kommissionierleistung ist es notwendig, die Lastenhandhabung einer schweren Entnahmeeinheit zu simulieren. Für diesen Effekt kommen Kleinladungsträger (KLT) mit einer Größe von 40 x 30 x 28 cm (B x T x H) zum Einsatz, um ein symmetrisch beidhändiges Hantieren etwa in Schulterbreite zu gewährleisten. Diese KLT werden von den Probanden zwischen drei Regalen (B x T x H: 90 x 40 x 180 cm) in fest vorgegebener Richtung bewegt. Die Regale sind dabei in Form eines Dreiecks positioniert und verfügen über höhenverstellbare und somit anthropometrisch an die Probanden anpassbare Regalhöhen. Mit dieser Modifikation der Entnahmehöhe, können die oben beschriebenen Körperhaltungen simuliert werden.

Studienpopulation

Die Stichprobe setzt sich aus 12 männlichen Personen zusammen. Das durchschnittliche Alter der Stichprobe beträgt 23,25 Jahre (SD = 3,37). Die durchschnittliche Größe der Probanden beläuft sich auf 180,92 cm (SD = 4,96). Das Gewicht der Probanden ist im Durchschnitt auf 78,83 kg (SD = 10,73) zu beziffern. Die Stichprobengröße von 12 Probanden wurde anhand einer A-Priori-Poweranalyse in G-Power (Erdfelder et al., 2007) ermittelt.

Zeitmessverfahren

Zur Zeitmessung kamen Kamerasysteme und eine Stoppuhr zum Einsatz. Die Auswertung der Rundenzeiten erfolgte mit Hilfe der Filmspur, die Stoppuhr diente lediglich zur Absicherung falls eine Kamera während der Aufnahme ausfiel. Die kamerabasierten Aufnahmen waren durch genaue Start- und Endpunkte definiert.

Auswertung

Bei dem Versuchsdesign handelt es sich um eine 3-faktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen. Durch das Messen von 16 Expositionen mit 12 Versuchspersonen, wurden insgesamt 192 Datensätze gespeichert. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS.

Ergebnisse

Bei der statistischen Auswertung werden drei Haupteffekte und zwei Interaktionseffekte untersucht.

Nachfolgend werden die untersuchten Effekte und die dazugehörigen Ergebnisse aus der statistischen Auswertung dargelegt:

- Durch den Einsatz eines Exoskeletts wird die Kommissionierleistung erhöht.
(Haupteffekt 1, Mittelung über Lastmasse und Körperhaltung)
 - Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt des Exoskeletts auf die Kommissionierleistung, $F(1,10) = 6.575$, $p = .028$: $\hat{\eta}_p^2 = .397$. Zum Einfluss des Exoskeletts auf die Kommissionierleistung wird festgestellt, dass das Tragen eines Exoskeletts zu einer Verringerung der Kommissionierleistung führt. Demnach kann die Annahme für den vorliegenden Fall, dass die Unterstützung eines Exoskeletts zu einer Erhöhung der Kommissionierleistung führt, verworfen werden.
- Bei Hebevorgängen mit leichten Lastmassen wird die Kommissionierleistung erhöht.
(Haupteffekt 2, Mittelung über Exoskelett und Körperhaltung)
 - Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Lastmasse auf die Kommissionierleistung, $F(1,10) = 37.803$, $p < .001$: $\hat{\eta}_p^2 = .791$. Zum Einfluss der zu handhabenden Lastmasse auf die Kommissionierleistung kann festgestellt werden, dass sich die Zunahme der Lastmasse negativ auf die Kommissionierleistung auswirkt. Demnach kann die Hypothese „Bei Hebevorgängen mit leichten Lastmassen wird die Kommissionierleistung erhöht“ bestätigt werden.
- Je belastender die Körperhaltung, desto kleiner die Kommissionierleistung.
(Haupteffekt 3, Mittelung über Exoskelett und Lastmasse)
 - Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Körperhaltung auf die Kommissionierleistung, $F(2,20) = 16.428$, $p < .001$: $\hat{\eta}_p^2 = .622$. Zum Einfluss der Körperhaltung auf die Kommissionierleistung wird festgestellt, dass die Kommissionierleistung mit der am geringsten belastenden Körperhaltung am höchsten ist. Zwischen KH2

und KH3 kann jedoch keine signifikante Änderung der Kommissionierleistung festgestellt werden.

- Je höher das zu kommissionierende Lastgewicht, desto größer die Kommissionierleistung mit Exoskelettunterstützung gegenüber ohne.
(Interaktionseffekt 1, Mittelung über Körperhaltung)
 - Die ANOVA zeigt, dass es keine signifikante Interaktion zwischen Exoskelett und Lastmasse gibt, $F(1, 10) = .251$, $p = .627$: $\eta_p^2 = .371$. Daraus kann abgeleitet werden, dass keine Wechselwirkung zwischen den Faktoren Exoskelett und Lastmasse besteht und der Effekt der Lastmasse unabhängig davon ist, ob ein Exoskelett eingesetzt wurde sowie der Effekt des Exoskeletts unabhängig davon ist, welche Lastmasse getragen werden musste. Entsprechend der Auswertung kann für die Kommissionierleistung geschlussfolgert werden, dass unter Einsatz eines Exoskeletts die Kommissionierleistung mit steigendem Lastgewicht gegenüber einer Ausführung ohne Exoskelett nicht erhöht werden kann.

- Je belastender die Körperhaltung, desto größer die Kommissionierleistung mit Exoskelettunterstützung gegenüber ohne.
(Interaktionseffekt 2, Mittelung über Lastmasse)
 - Die ANOVA zeigt, dass es keine signifikante Interaktion zwischen Exoskelett und Lastmasse gibt, $F(2,20) = 1.021$, $p = .378$: $\eta_p^2 = .309$. Es ist, wie aus der Vorbeurteilung der Haupteffekte hervorgeht, lediglich zu erkennen, dass der Referenzwert ohne den Einsatz eines Exoskeletts einen geringeren Wert annimmt als mit einem Exoskelett. Anhand der Auswertung ergibt sich folgende Schlussfolgerung für die Kommissionierleistung. Durch die Ausführung von belastenderen Körperhaltungen kann durch das Tragen eines Exoskeletts keine Steigerung der Kommissionierleistung erzielt werden.

Neben dem Einfluss von Exoskeletten auf die Kommissionierleistung wurde auch nach Ursachen für die entstandenen Zeitveränderungen gesucht. Die Videoaufnahmen wurden hinsichtlich Bewegungsverhalten der Probanden im Versuchsverlauf und im Vergleich der Expositionen nach verschiedenen Kriterien analysiert (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6 Untersuchungskriterien Bewegungsverhalten Laborstudie 1

Untersuchungskriterium	Unterschied bei Ausführung mit und ohne Exoskelett	Bemerkung
Armhaltung	Ja	Unterschied erkennbar bei 2/12 Probanden
Ellenbogenwinkel	Nein	
Rumpfbeugung	Ja	Unterschied erkennbar bei 2/12 Probanden

Hüftwinkel	Nein	
Kniewinkel	Ja	Unterschied erkennbar bei 3/12 Probanden

Wie in Tabelle 6 ersichtlich ist, kann den Videoaufzeichnungen entnommen werden, dass es bei den Untersuchungskriterien Armhaltung, Rumpfbeugung und Kniewinkel eine Veränderung im Bewegungsverhalten der Probanden mit und ohne Exoskelettanwendung gibt. Diese Änderungen treffen nicht auf alle Probanden zu, sondern nur auf zwei bzw. drei der zwölf Probanden und auch bei diesen Probanden ist der Unterschied nicht dauerhaft zu beobachten, sondern nur bei vereinzelten Bewegungsabfolgen.

Armhaltung: Zwei von zwölf Probanden halten die Arme mit Exoskelettanwendung weiter entfernt vom Körper als ohne. Bei den anderen Probanden ist aus den Videoaufzeichnungen kein Unterschied zu entnehmen.

Rumpfbeugung: Bei zwei von zwölf Probanden ist bei gebeugter Lastaufnahme mit Exoskelett zu erkennen, dass der Rücken mehr gestreckt ist als bei ohne Exoskelettanwendung. Bei den anderen Probanden ist aus den Videoaufzeichnungen kein Unterschied zu entnehmen.

Kniewinkel: Bei drei von zwölf Probanden ist bei gebeugter Lastaufnahme mit Exoskelett zu erkennen, dass die Knie mehr durchgestreckt sind als bei ohne Exoskelettanwendung. Bei den anderen Probanden ist aus den Videoaufzeichnungen kein Unterschied zu entnehmen.

Bei den Erkenntnissen handelt es sich um marginale Unterschiede im Bewegungsverhalten. Es ist nicht eindeutig belegbar, ob auf diese Unterschiede die Zeitdifferenzen der Kommissionierzeiten mit und ohne Exoskelettanwendung zurückzuführen sind.

Studiendesign 2: Untersuchung von Bewegungsmustern des menschlichen Körpers mittels Inertialsensormesssystem mit und ohne Exoskelettanwendung

Vorbereitung

Für das Studiendesign 2 wurden Vorversuche durchgeführt. In dieser Vorbereitungszeit wurden Versuchsstände konzipiert, verschiedene Expositionen mit Versuchspersonen getestet, das Inertialsensormesssystem Xsens mit Exoskelettanwendung getestet und geeignete Segmentierungs- sowie Normalisierungsmethoden erarbeitet. Die Ergebnisse der Vorversuche flossen in das finale Versuchsdesign ein.

Versuchsdesign

Konstruktion eines repräsentativen Versuchsstands in Laborumgebung
Zur Konzeption der Laborstudie wurden Merkmale der LMM-HHT der BAuA (2019b) herangezogen, die durch den Exoskeletteinsatz beeinflusst werden sowie Beobachtungen aus den Feldstudien beachtet. Dabei wurden die für die Kommissioniertätigkeit und für den Exoskeletteinsatz

typischen Belastungsmerkmale als Parameter ausgewählt. Diese sind die wirksame Lastmasse, die Körperhaltung und das Exoskelett (unabhängige Variablen). Sie beeinflussen die abhängige Variable Bewegungsmuster (Beugewinkel des Rumpfes, der Knie und der Hüfte). In 8 Expositionen (vgl. Tabelle 6) wurden zwei verschiedene Lastmassen (Lastmasse 1: 7,5 kg, Lastmasse 2: 12,5 kg) aus zwei Lastklassen der LMM-HHT sowie zwei verschiedene Körperhaltungsfolgen untersucht (vgl. Abbildung 16).

Tabelle 7: Übersicht Expositionen Studiendesign 2

Belastungsfall	Bezeichnung	Körperhaltung	Lastmasse	Häufigkeit	Exoskelett	Anzahl der Vorgänge mit nach vorn gebeugter Körperhaltung
1	E1	KH1	LM1	5	ohne Exo	20
2	E2	KH2	LM1	5	ohne Exo	20
3	E3	KH1	LM2	5	ohne Exo	20
4	E4	KH2	LM2	5	ohne Exo	20
5	E5	KH1	LM1	5	mit Exo	20
6	E6	KH2	LM1	5	mit Exo	20
7	E7	KH1	LM2	5	mit Exo	20
8	E8	KH2	LM2	5	mit Exo	20

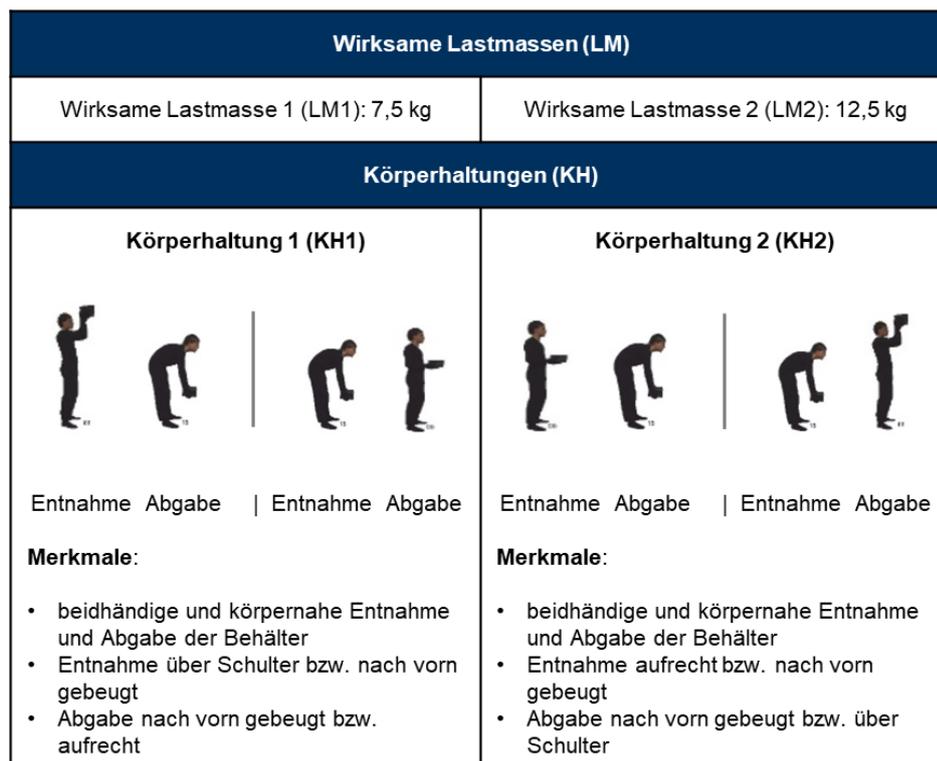


Abbildung 16: Belastungsmerkmale Studiendesign 2

Versuchsaufbau

Als Grundlage für den Versuchsaufbau dienten zwei Schwerlastregale und eine Palette, welche in Form eines Dreiecks im Laborraum positioniert wurden. Die Probanden bewegten die Kommissionierbehälter nach fest vorgegebenen Bewegungsabläufen (Regieanweisungen) zwischen den Regalen und der Palette auf unterschiedlicher Höhe i. S. einer Lastaufnahme und -abgabe. Die

Regalfachhöhen wurde an die Anthropometrie der Probanden angepasst, um einheitliche Versuchsbedingungen für alle Probanden zu gewährleisten.

Studienpopulation

Die Versuche wurden mit 16 männlichen Probanden im Alter zwischen 19-31 Jahren durchgeführt. Die Stichprobengröße von 16 Probanden wurde anhand einer A-Priori-Poweranalyse in G-Power (Erdfelder et al., 2007) ermittelt.

Messverfahren zur Bewegungsaufnahme

Zur Aufnahme der Bewegungsmuster wurde das Inertialsensormesssystem Xsens verwendet. Zusätzlich kam eine mit Xsens synchronisierte Kamera zum Einsatz. Die Auswertung der Bewegungsmuster erfolgte mit Hilfe der Xsens-Aufnahmen. Die Kamera diente lediglich zur Absicherung der Nachvollziehbarkeit der Messungen. Die Xsens-Aufnahmen waren durch genaue Start- und Endpunkte definiert.

Auswertung

Der statistische Vergleich der erfassten Beugewinkel erfolgt über ein statistical parametric mapping (SPM) in Matlab. Hierüber lassen sich Aussagen über mögliche statistisch signifikante Unterschiede des Bewegungsmusters mit und ohne Exoskelettanwendung über den zeitlichen Verlauf der durchlaufenen Expositionen für die einzelnen Beugewinkel treffen. Durch das Messen von acht Expositionen mit je fünf Wiederholungen mit 16 Versuchspersonen wurden insgesamt 640 Datensätze gespeichert. Jeder Datensatz enthält vier für die Auswertung relevante Vorgänge (mit nach vorn gebeugter Körperhaltung). Somit werden 2560 Vorgänge ausgewertet.

Zudem werden mögliche kurz- und langfristige Folgen physischer Belastung aufgrund der veränderten Körperhaltung mittels RULA-Bewertung abgeleitet. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für den Exoskeletteinsatz in Unternehmen abgeleitet und in der Handlungsanleitung ergänzt.

Ergebnisse

Bei der statistischen Auswertung werden zwei Haupteffekte und zwei Interaktionseffekte untersucht.

Zu untersuchende Hypothesen lauten:

Die Anwendung passiver Exoskelette zur Rumpfunterstützung führt bei manuellen Hebe- und Absenkvorgängen zu einer

- Veränderung der Bewegung. (Haupteffekt 1)
 - besseren Körperhaltung. (Interaktionseffekt 1)
- Reduzierung der physischen Belastung. (Haupteffekt 2)
 - Erhöhung der physischen Belastung der Knie. (Interaktionseffekt 2)

Erste Ergebnisse zeigen (Le, 2020) eine Unterstützungsfunktion des Exoskeletts hinsichtlich (vgl. Abbildung 17):

- Flexion: Der nicht vorhandene abrupte Winkelabfall und -anstieg im Fall mit Exoskelett kann auf die **stabilisierende Unterstützungsfunktion des backX** zurückzuführen sein. Für den Fall mit Exoskelett ist aufgrund der höheren Flexion, welche den Hauptteil der Bewegung darstellt, von einer **höheren Stabilität** auszugehen.

- **Bewegungsglätte:** Aus den Messkurven lassen sich mit Exoskelett **keine negativen Effekte** auf die Bewegungsmuster erkennen. Stattdessen manifestiert sich der **Einfluss in einem glatteren Verlauf**.

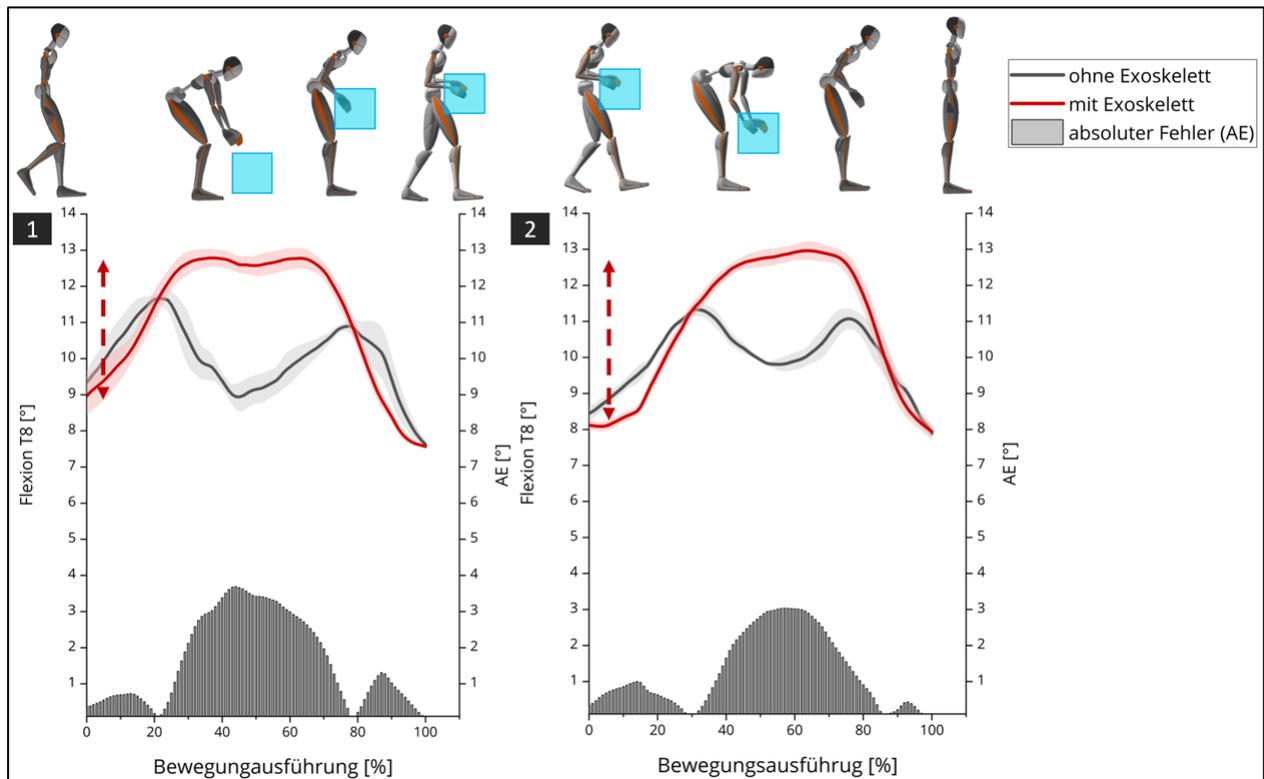


Abbildung 17: Flexion des Oberkörpers ohne und mit Exoskelettanwendung (Le, 2020)

Weitere Ergebnisse werden mit der Dissertationsschrift (Promotionsvorhaben Stöhr, 2022) veröffentlicht.

2.4. Ableitung von Handlungsempfehlungen (AP 5)

Simulation von Bewegungs- und Belegungsstrategien

Das Teilpaket zielte darauf ab, Strategien der Lagerplatzvergabe, Einlastungsreihenfolge und Auftragssteuerung in der Kommissionierung abzubilden und anhand repräsentativer Szenarien simulativ zu evaluieren. Das Simulationsmodell erlaubt jeweils den Vergleich eines Systems mit einer Kommissionierung ohne Exoskelett und mit Exoskelett. Die Verwendung von Exoskeletten wird unter anderem durch die Anpassung relevanter Leistungsparameter bzw. von Zeitbausteinen für einzelne Tätigkeiten wie Greifen, Laufen und Heben abgebildet. Für das Anlegen bzw. den Tausch eines Exoskeletts wurde eine Wechselzeit eingerechnet. Beim Nachbau des manuellen Kommissioniersystems in einer Simulationsumgebung wurde sich in der Layoutstruktur an geeigneten Arbeitsumgebungen der betrachteten Projektpartner orientiert. Im Rahmen der Auftragssteuerung können Batches, z. B. eine Gruppe von Aufträgen zusammenfassen, gebildet werden, um den stellenweisen Einsatz von Exoskeletten zu unterstützen.

Die Experimentierumgebung erlaubt folgende veränderbare Parameter in der Simulation:

- Articleigenschaften: Abmessungen, Gewicht (Last zwischen 3 kg und 25 kg)
- Zonierung und Anordnung der Artikel nach Gewicht
- Bewegen der Last mit / ohne Unterstützung durch Kommissionierwagen
- Auftragslisten mit unterschiedlicher Arbeitsintensität
- Aufteilung des Kommissioniervorgangs auf zwei Personen: Entnahme aus dem Regal mit Exoskelett, Transportieren der Güter zum Abgabepunkt ohne Exoskelett

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Laborstudie, die keinen signifikanten Effekt der Exoskelettanwendung auf die Kommissionierleistung zeigte, wurde auf weitergehende Experimente und Analysen verzichtet.

Aufbereitung von Handlungsempfehlungen für den Anwender

Das Ablaufdiagramm in Abbildung 18 als zentraler Bestandteil der Handlungsanleitung (vgl. Anlage digital 1) zeigt, wie zur Arbeitsplatzuntersuchung vorgegangen werden sollte, um einen Exoskeletteinsatz zu planen und zu erproben. Dieses Vorgehen wurde während der Feldstudien entwickelt und validiert.

Im Folgenden werden die drei Stufen zur Untersuchung der Arbeitsplatzzeignung für einen möglichen Exoskeletteinsatz (vgl. Abbildung 18) kurz erläutert:

Stufe 1: Die entwickelte Vorgehensweise besteht zunächst aus einer **Arbeitsplatzsichtung**. Arbeitsplätze kommen für einen möglichen Exoskeletteinsatz nicht in Frage, wenn u. a. Ausschlusskriterien wie nicht genügend Bewegungsfreiraum vorliegen.

Stufe 2: Zur Durchführung der Ergonomieanalyse werden die aktuellen MEGAPHYS-Leitmerkmalmethoden der BAuA (2019b) angewandt. Es sind nur dann Exoskelette in Betracht zu ziehen, wenn **technische und organisatorische Maßnahmen zur Belastungsminderung nach Maßnahmenhierarchie der Gestaltung ausgeschöpft sind und nicht zur ausreichenden Belastungsminderung führen (Ampelfarbe Grün)**. Es erfolgt die Ableitung von Maßnahmen zur Gestaltung/Veränderung der Arbeitssituation. Dabei sind vordergründig technische und organisatorische Maßnahmen zu ergreifen. Werden ergänzend personenbezogene Maßnahmen in Betracht gezogen und gehören Exoskelette zu den Überlegungen, ist zunächst zu prüfen, ob ein ausreichender Punkteabbau durch die Maßnahme Exoskeletteinsatz erreicht werden kann. Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung unter Einbeziehung der Maßnahme Exoskelett und Weitere: iterative Überprüfung der ergonomischen Absicherungsmaßnahmen (s. Kamusella & Schmauder, 2021). Ziel: Verringerung von Punkten in einen niedrigeren Risikobereich. Erst danach ist eine Exoskelettauswahl und -erprobung sinnvoll. Abhängig von dem Tätigkeitsspektrum findet eine Auswahl geeigneter Exoskelette nach Bauart statt. Die Feldstudien zeigten, dass bei Kommissioniertätigkeiten rumpfunterstützende Exoskelette geeignet sind. Vorzugsweise solche, die sich bei Körperfortbewegung automatisch deaktivieren.

Stufe 3: Die anschließende **Beanspruchungsbefragung** dient zur Messung der Erleichterung der Arbeit durch den Exoskeletteinsatz. Wird eine Erleichterung empfunden, ist ein Exoskeletteinsatz schließlich möglich.

Weitere Erläuterungen zur erarbeiteten Handlungsanleitung sind der Anlage digital 1 zu entnehmen.

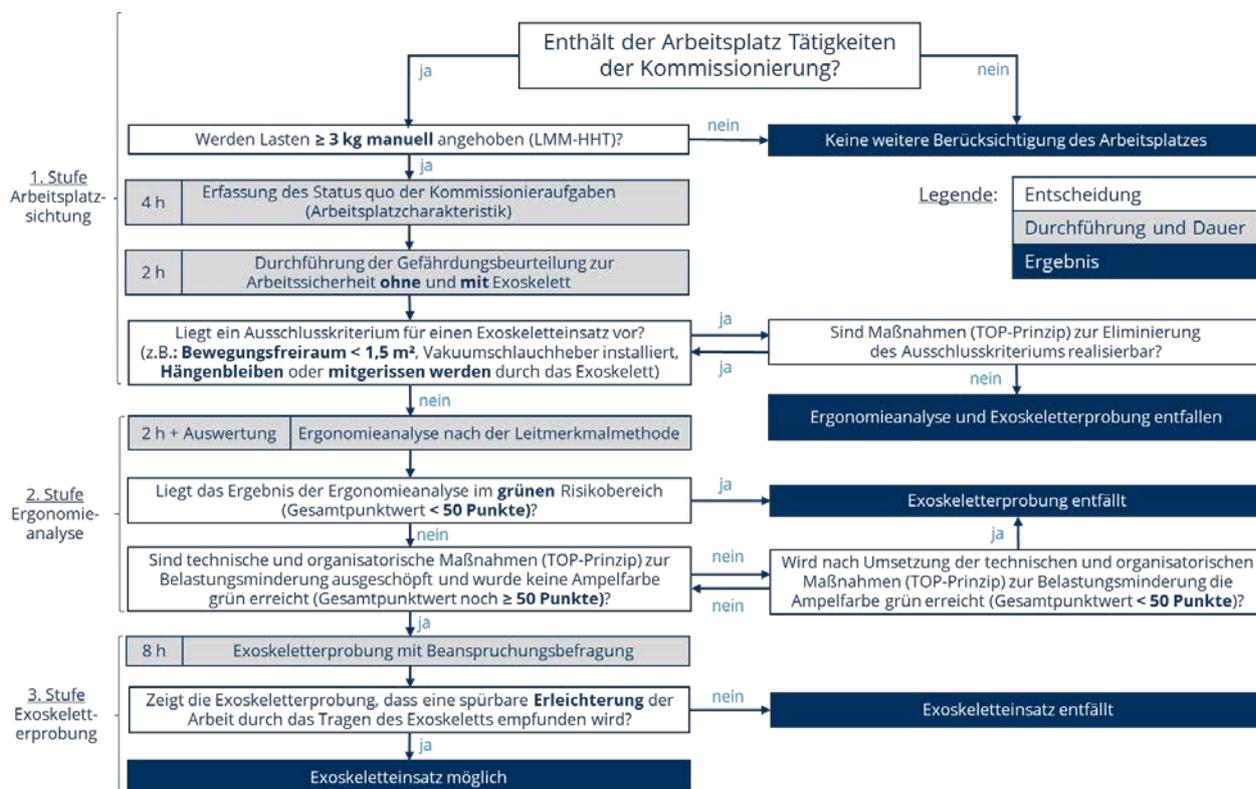


Abbildung 18: Ablaufdiagramm zur Untersuchung der Arbeitsplatz eignung für einen möglichen Exoskeletteinsatz

Zudem veröffentlichten Kamusella und Schmauder (2021) eine Vorgehensweise zur Neubewertung der Arbeitsbelastungssituation beim Tragen eines Exoskeletts.

2.5. Veröffentlichungen und Schlussbericht (AP 6)

Im Berichtszeitraum wurden mehrere Fachbeiträge erarbeitet und für eine Teilnahme an Konferenzen eingereicht (vgl. Kapitel 6). Die jeweils positiven Begutachtungen berechtigten zur Präsentation eines Vortrags auf der Konferenz. Die Forschungsergebnisse wurden dort einem Fachpublikum vorgestellt und diskutiert. Die schriftlichen Konferenzbeiträge wurden anschließend im Tagungsband veröffentlicht.

Eine Veröffentlichung der Handlungsanleitung (vgl. Anlage digital 1) auf den Internetseiten des Antragstellers wird vorbereitet. Sie ist in 2022 geplant.

Im Berichtszeitraum fanden zwei Treffen des projektbegleitenden Ausschusses statt. Die Forschungsergebnisse wurden in Präsentationen vorgestellt und mit den Vertretern aus Kammern, Planungsbüro, Ausbildungsunternehmen und Industrie diskutiert. Der Zwischenbericht für 2019 und 2020 sowie dieser Schlussbericht wurden erstellt.

3. Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Tabelle 8: Tatsächlicher Personaleinsatz beider Forschungsstellen

Arbeitspaket (AP)	Beschreibung	Verwendung der Zuwendung	
		Fst. 1:	Fst. 2:
1	Vorbereitung der Feldstudien	2 PM	1 PM
2	Durchführung der Feldstudien	2 PM	5 PM
3	Durchführung der Laborstudie	3 PM	5,03 PM
4	Analyse und Aufbereitung der Messdaten	5,94 PM	4,77 PM
5	Bewertung der Messungen und Ableitung von Handlungsempfehlungen	3 PM	4 PM
6	Veröffentlichungen und Schlussbericht	2 PM	2 PM
Summe		17,94 PM	21,8 PM

Aufgrund beantragter und gewährter Laufzeitverlängerung weicht für beide Forschungsstellen der tatsächliche Personaleinsatz vom Forschungsantrag ab.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten waren notwendig und angemessen, da sie den Punkten im Arbeitsplan des Projektantrages entsprachen. Dadurch wurden alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet.

5. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Vorgehensweise (Handlungsanleitung, vgl. Anlage digital 1) entwickelt, die Unternehmen bei der Planung des Einsatzes eines passiven Exoskeletts zur Rumpfunterstützung begleitet. Dazu wurden Ausschlusskriterien erarbeitet, um Entscheidungen zu Ein- oder Ausschluss eines möglichen Exoskeletteinsatzes zu stützen (vgl. Seite 10 Erarbeitete Ausschlusskriterien zeigen Grenzen für den Exoskeletteinsatz bei manuellen Kommissionieraufgaben).

Die erarbeitete Handlungsanleitung unterstützt betriebliche Praktiker als Planungsgrundlage für den Einsatz von Exoskeletten in der Kommissionierung. Es soll die häufig geübte Praxis von

Versuch und Irrtum bei der Einführung der Exoskelettnutzung durch eine systematische Vorgehensweise abgelöst werden. Bereits im Vorfeld der Nutzung sollen die mögliche Entlastungswirkung abgeschätzt und mögliche Grenzen des Einsatzes deutlich werden.

6. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 9: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Vorbereitung der Feldstudien	Vor-Ort-Meeting zur Präsentation Exoskelette und Erläuterung zum Einsatz, Abstimmung Feldstudie, Vorstellung aller Arbeitsbereiche mit Kommissionieraufgaben:	
	mit Cyberport GmbH	16.01.2020
	mit Bike24 GmbH	04.02.2020
	mit Prinovis GmbH & Co. KG	02.07.2020
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	08.07.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	22.09.2020
	mit Getränke Pfeifer GmbH	30.09.2020
	mit Spanier & Bichler GmbH	19.04.2021
mit ALTRAD plettac assco GmbH	24.09.2021	

Durchführung der Feldstudien	Vor-Ort-Begehung zur Erfassung des Status quo operativer Kommissionieraufgaben, Durchführung der Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit, Erfassung der Belastungssituation körperlicher Arbeit, Erprobung der Exoskelette	
	mit Bike24 GmbH	18.02.2020
	mit Bike24 GmbH	04.03.2020
	mit Bike24 GmbH	10.11.2020
	mit Bike24 GmbH	17.11.2020
	mit Bike24 GmbH	24.11.2020
	mit Bike24 GmbH	01.12.2020
	mit Bike24 GmbH	07.12.2020
	mit Bike24 GmbH	08.12.2020
	mit Bike24 GmbH	14.12.2020
	mit Bike24 GmbH	15.12.2020
	mit Bike24 GmbH	21.12.2020
	mit Bike24 GmbH	22.12.2020
	mit Bike24 GmbH	12.01.2021
	mit Bike24 GmbH	02.02.2021
	mit Bike24 GmbH	09.02.2021
	mit Bike24 GmbH	23.02.2021
	mit Bike24 GmbH	01.03.2021
	mit Bike24 GmbH	09.03.2021
	mit Bike24 GmbH	15.04.2021
	mit Bike24 GmbH	03.05.2021
	mit Bike24 GmbH	05.05.2021
	mit Prinovis GmbH & Co. KG	06.07.2020
	mit Prinovis GmbH & Co. KG	31.08.2020
	mit Prinovis GmbH & Co. KG	21.09.2020
	mit Prinovis GmbH & Co. KG	28.09.2020
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	16.09.2020
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	23.09.2020
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	14.10.2020
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	06.01.2021
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	07.01.2021
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	08.01.2021
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	27.01.2021
	mit Gemeinhardt Gerüstbau Service GmbH	28.01.2021
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	14.10.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	19.11.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	20.11.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	23.11.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	24.11.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	27.11.2020
	mit Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG	30.11.2020
	mit Getränke Pfeifer GmbH	07.10.2020
	mit Getränke Pfeifer GmbH	02.11.2020
	mit Getränke Pfeifer GmbH	03.11.2020
	mit Getränke Pfeifer GmbH	04.11.2020
	mit Spanier & Bichler GmbH	19.04.2021
	mit Spanier & Bichler GmbH	20.04.2021

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
	mit Spanier & Bichler GmbH	21.04.2021
	mit Spanier & Bichler GmbH	22.04.2021
	mit Cyberport GmbH	28.09.2021
	mit Cyberport GmbH	29.09.2021
	mit Cyberport GmbH	30.09.2021
	mit Cyberport GmbH	01.10.2021
	mit ALTRAD plettac assco GmbH	15.11.2021
	mit ALTRAD plettac assco GmbH	16.11.2021
	mit ALTRAD plettac assco GmbH	17.11.2021
Präsentation Ergebnisse	mit ALTRAD plettac assco GmbH	17.01.2022
Information und Wissensvermittlung	Informationstransfer mit Handwerkskammer Dresden	09.03.2020
	Webinar Ottobock	08.10.2020,
	Webinar Ottobock	13.11.2020,
	Webinar Ottobock	18.08.2021,
	Webinar Ottobock	10.11.2021,
	Webinar Ottobock	07.02.2022,
	Webinar Ottobock	10.03.2022,
	Webinar Ottobock	23.03.2022
	Die angestrebten Forschungsergebnisse fließen in Gemeinschaftsprojekte der Antragssteller mit Partnern aus der Industrie ein und leisten dort einen Beitrag zur Erhöhung der Ergebnisqualität.	ab 06/2021
	Informationstransfer mit LOGSOL GmbH	16.07.2021
	Informationstransfer mit Schoeller Technocell GmbH & Co. KG	18.03.2022
Projektbegleitender Ausschuss	Sitzungen des PA, 1. Projekttreffen	16.06.2020
	Sitzungen des PA, 2. Projekttreffen	16.09.2021
Ansprache weiterer Unternehmen	Gewinnung weiterer Firmen im Projekt: MTM ASSOCIATION e. V., Reifenwerk Heidenau GmbH & Co. KG, ALTRAD plettac assco GmbH	06/2020 09/2020 04/2021

Publikationen	Exoskelette bei manuellen Kommissionieraufgaben? In <i>Sicher ist sicher</i> .	10/2021, 11/2021
	Einsatz von passiven Exoskeletten an manuellen Kommissionierarbeitsplätzen und deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten in <i>Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Tagungsband</i>	03/2022
	Bewertung der Kommissionierleistung mit und ohne Exoskelettanwendung für typische manuelle Kommissionieraufgaben in <i>Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Tagungsband</i>	03/2022
	<u>Studien- und Abschlussarbeiten zu Exoskeletten:</u>	
	Musick C: Literaturstudie zum nationalen und internationalen Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Vor- und Nachteilen beim Einsatz von Exoskeletten	07/2019
	Hoffmann D: Entwicklung des Designs einer Laborstudie zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens bei Nutzung passiver Exoskelette für Lastenhandhabungstätigkeiten	10/2019
	Le H: Erarbeitung eines Versuchsablaufs zur Untersuchung von Bewegungsmuster und -geschwindigkeit bei Nutzung passiver Exoskelette	11/2019
	Stöhr R: Einsatz von Exoskeletten an Kommissionierarbeitsplätzen	04/2020
	Musick C: Vorbereitung von Feldstudien zur Nutzung passiver Exoskelette in der Kommissionierung	05/2020
	Le H: Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung und Auswertung der Kinematik des Nutzers bei manuellen Kommissioniertätigkeiten ohne und mit Exoskelett	08/2020
	Musick C: Konzeption einer Laborstudie zur Untersuchung der Kommissionierleistung mit und ohne Exoskelettanwendung	03/2021
	Petko E: Methodische Aufbereitung von Feldstudien zur Datenauswertung der Untersuchungen zu Beanspruchung und Gefährdungsbeurteilung im Rahmen des Projektes ExoKomm	05/2021
	Wagner K: Bearbeitung von Feldstudien im Rahmen des Projektes ExoKomm	06/2021
	Senf N: Methodische Aufbereitung von Feldstudien zur Datenauswertung des Status quo operativer Kommissionierungsaufgaben und der Belastungssituation körperlicher Arbeit im Rahmen des Projektes ExoKomm	07/2021
	Hoppe M: Ableitung eines Stellschraubenkonzepts unter Berücksichtigung des Einsatzes passiver Exoskelette für Ergonomieanalysen physischer Belastungen in der Kommissionierung	07/2021

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
	Tietz B: Konzeption einer Laborstudie zur Untersuchung der Kommissionierleistung bei Nebentätigkeiten der Kommissionierung mit und ohne Exoskelettanwendung	10/2021
Vorträge	Planungsgrundlage für den Einsatz von Exoskeletten in der Kommissionierung auf dem <i>A+A Kongress</i>	10/2021
	Einsatz von passiven Exoskeletten an manuellen Kommissionierarbeitsplätzen und deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten auf dem <i>Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Frühjahrskongress</i>	03/2022
	Bewertung der Kommissionierleistung mit und ohne Exoskelettanwendung für typische manuelle Kommissionieraufgaben auf dem <i>Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Frühjahrskongress</i>	03/2022
	Erhebliche Einschränkungen durch COVID-19-Pandemie	
Lehre	Ausbildung von Absolventen	fortlaufend
	Ergänzung des Themenkomplexes in Vorlesungen wie z.B. „Systeme der Intralogistik“, „Produktion & Logistik“ bzw. „Arbeitsorganisation“, „Ergonomie“, „Arbeitsschutz- und Risikomanagement“, „Arbeitswissenschaftliche Prozessgestaltung“	ab 10/2021
	DRK Bildungswerk Sachsen gemeinnützige GmbH	17.03.2022
	DRK Bildungswerk Sachsen gemeinnützige GmbH	21.03.2022
Messeteilnahme	Erhebliche Einschränkungen durch COVID-19-Pandemie	-
Internet	Internetseiten des Antragstellers	fortlaufend

Geplante Transfermaßnahmen

Tabelle 10: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Wissenschaftliche Qualifikation	Weitere Aspekte und Varianten der im Projekt identifizierten Problemstellung sollen im Rahmen zweier Dissertationen untersucht werden:	
	Promotionsvorhaben Stöhr: Einsatz von passiven Exoskeletten an manuellen Kommissionierarbeitsplätzen und deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten	geplant
	Promotionsvorhaben Kreil: Bewertung der Kommissionierleistung mit und ohne Exoskelettanwendung für typische manuelle Kommissionieraufgaben	geplant

Maßnahme	Beschreibung	Zeitraum
Publikationen	Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Frühjahrskongress, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Tagungsband, Hannover Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Ergebnispräsentation	03/2023
Lehre	Aufnahme von wissenschaftlich gewonnenen Erkenntnissen zum Projektthema in die Lehrveranstaltungen	fortlaufend
Internet	In Vorbereitung: Veröffentlichung der Handlungsanleitung auf den Internetseiten des Antragstellers	geplant in 2022
Information und Wissensvermittlung	Forum Technische Logistik, Zusage bereits erfolgt, Thema wird noch definiert, Dresden	08.09.2022
	Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Frühjahrskongress, Ergebnispräsentation Laborstudie 1.1, Hannover	08.03.2023
	Fachtagung DGUV "Arbeitsplanung und Prävention", Mainz	18.04.2023

Quellen

- Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik [BGHW]. (2018). Gefährdungsbeurteilung kompakt - Einzelhandel allgemein. Zugriff am: 1. März 2022. Verfügbar unter: https://kompendium.bghw.de/bghw/xhtml/document.jsf?alias=bghw_gbk_b12ama131_1_&&event=navigation
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [BAuA]. (2019a). Gefährdungsfaktoren: Ein Ratgeber. Zugriff am: 1. März 2022. Verfügbar unter: www.baua.de/gefaehrungsfaktoren
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019b) MEGAPHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2019, Band 1.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019c). Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Berichtsjahr 2018: Unfallverhütungsbericht Arbeit. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2020, 2. Auflage.
- Erdfelder E, Buchner A, Faul F, Lang G-A (2007). Statistik-Software, G-Power
- Gudehus, T. (2010). Logistik (4. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Günther, W. A., Deuse, J., Rammelmeier, T. & Weisner, K. (2014). Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen (ErgoKom). München. Dortmund. Technische Universität München.
- Hompel, M. ten, Sadowsky, V. & Beck, M. (2011). Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik (1. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [IFA]. (2019). Gefährdungsbeurteilung für Exoskelette Version 1.1 - Entwurf. Zugriff am: 1. März 2022. Verfügbar unter: <https://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/praxishilfen-ergonomie/exoskelette/index.jsp>
- Kamusella C., Hoske P. (2018). Studie zu Dreipunkt- und Vierpunktgurten in Baumaschinen. Ergebnisbericht für die GRAMMER AG.
- Kamusella, C., Schmauder, M. (2019). Steharbeitsplätze mit Lasthandhabung: Einfluss des Belastungswechsels auf Muskelbeanspruchung, Beschwerdeempfinden und Beinvolumenänderung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 73(1), 78–89. <https://doi.org/10.1007/s41449-018-0120-0>
- Kamusella C, Schmauder M (2021). Exoskelette bei manuellen Kommissionieraufgaben? Sicher ist sicher 10-2021 und 11/2021, S. 475-481 und S. 526-536. Erich Schmidt Verlag

- Kamusella C, Schmauder M (2021). Exoskelette bei manuellen Kommissionieraufgaben? Sicher ist sicher 10-2021 und 11/2021, S. 475-481 und S. 526-536. Erich Schmidt Verlag
- Kreil C (2022). Promotionsvorhaben: Betrachtung und Bewertung der Kommissionierleistung mit und ohne Exoskelettanwendung für typische manuelle Kommissionieraufgaben unter Berücksichtigung verschiedener Parameter
- Stöhr R (2022). Promotionsvorhaben: Einsatz von passiven Exoskeletten an manuellen Kommissionierarbeitsplätzen und deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten
- Unfallkasse Hessen [UKH]. (2013). Dokumentationsvorlage für die Gefährdungsbeurteilung gemäß §§5, 6 Arbeitsschutzgesetz. Zugriff am: 1. März 2022. Verfügbar unter: <https://www.ukh.de/praevention/gefaehrdungsbeurteilung/>
- Verein Deutscher Ingenieure [VDI] (1994). VDI 3590 Blatt 1 - Kommissioniersysteme - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag.
- Walch, M. D. (2011). Belastungsermittlung in der Kommissionierung vor dem Hintergrund einer altersgerechten Arbeitsgestaltung der Intralogistik [Dissertation]. Technische Universität, München. S. 143.

Anlagenverzeichnis digital

Es folgt eine Auflistung der digitalen Anlagen.

Anlage digital 1: *Handlungsanleitung ExoKomm*