

Spezifizierung von Arbeitstätigkeiten zur Erstellung eines Co-Simulationsmodells

Wissensbasierte Auswahl von Exoskeletten

T. Drees, R. Weidner, B. Kuhlenkötter

ZUSAMMENFASSUNG Die erfolgreiche Auswahl eines industriellen Exoskeletts erfordert für den Selektionsprozess eine fundierte Kenntnis über die betrachteten Arbeitsaufgaben. Dieser Beitrag beleuchtet zuerst den Status Quo bei Vorgehensweisen zur Auswahl eines Exoskelettes. Folgend wird ein Ansatz zur Überbrückung der Informationslücke zwischen der Aufnahme von Bewegungsdaten und der arbeitswissenschaftlichen Bewertung von Tätigkeiten vorgestellt, der als Start eines wissensbasierten Auswahlprozesses dient.

STICHWÖRTER

Mensch und Technik, Wissensmanagement, Produktionsarbeit

Knowledge-based selection of exoskeletons

ABSTRACT The successful selection of occupational exoskeletons for work activities requires sound knowledge of the work tasks under consideration for the selection process. This paper first examines the status quo for the selection of exoskeletons. Subsequently, it presents an approach for bridging the information gap between the recording of movement data and the ergonomic evaluation of activities, which serves as the starting point for a knowledge-based selection process.

1 Einleitung

Industrielle Exoskelette werden zunehmend in Unternehmen verschiedener Branchen eingesetzt und sollen die individuelle Beanspruchung der Mitarbeitenden als Resultat externer Belastung durch Unterstützung ihrer Bewegungen und Stabilisierung ihrer Haltung verringern [1]. Aus der Vielzahl verschiedener Exoskelette, deren für Laien schwierige Evaluation im Einsatz und die Neuheit der Technologie ergibt sich für Unternehmen die Herausforderung, für eine spezifische Arbeitsaufgabe und den jeweiligen Mitarbeitenden an einem definierten Arbeitsplatz das passende System auszuwählen.

Verschiedene Arbeitsaufgaben erfordern unterschiedliche Exoskelette zur Unterstützung der Belegschaft. Je nach Gestaltung unterstützen Exoskelette unterschiedliche Körperteile, etwa Arme, Beine oder den ganzen Körper [1, 2] und mit einer unterschiedlichen Unterstützungscharakteristik [3]. Darüber hinaus werden Exoskelette nach den unterstützten Aufgaben unterschieden (zum Beispiel Überkopfarbeiten, längeres Stehen, Tragen schwerer oder sperriger Gegenstände oder Gehen). Diese Einteilung erlaubt eine valide Vorauswahl von Exoskeletten, jedoch ist die endgültige Auswahl des am besten geeigneten Exoskeletts häufig subjektiv und von Firmenzugehörigkeiten beeinflusst und erfordert daher eine kritische Betrachtung. Zudem gibt es oft nur begrenzte Möglichkeiten für umfassende Tests oder Bewertungen verschiedener Systeme während des Auswahlprozesses der Exoskelette. Bei der Einführung von Exoskeletten an Arbeitsplätzen gibt es zwar oft eine anfängliche Testphase, jedoch wird in der Regel nur ein Exoskelett getestet, was zu Problemen bei der Akzeptanz durch

die Nutzer, der Eignung für die Aufgabe und der Effektivität des Systems führt [4].

Ein grundlegendes Hilfsmittel zur individuellen Auswahl eines Exoskelettes sowie der Vergleich verschiedener Systeme anhand verifizierbarer Effekte, etwa bezogen auf die Leistungsfähigkeit oder das Ermüdungsrisiko der Belegschaft (vergleiche [5]), existiert bisher nicht. Daher besteht der Bedarf nach einem systematischeren Ansatz, der wissensbasierte Techniken nutzt, um eine komplexe, multikriterielle Entscheidungsfindung zu erlauben. Dabei sollen die unterschiedliche Anthropometrie der Nutzenden, die spezifischen Aufgabenmerkmale und die Funktionalitäten des jeweiligen Exoskeletts innerhalb eines Co-Simulationsmodells integriert werden, um Vorteile für den Auswahlprozess eines Exoskelettes zu generieren.

Ziel des Beitrages ist daher, ein Konzept zur Erstellung eines wissensbasierten Assistenztools für die Auswahl geeigneter Exoskelette herzuleiten und zu beschreiben. Insbesondere sollen die Beschreibung der Arbeitstätigkeiten und die resultierenden Bewegungen der Mitarbeitenden analysiert werden. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Was ist der aktuelle Status Quo bei der Auswahl eines spezifischen Exoskelettes für einen Anwendungsfall?
- Wie können Bewegungen am Arbeitsplatz erfasst, bewertet und geeignet für den simulativen Vergleich von Exoskeletten genutzt werden?

2 Stand der Technik

2.1 Methoden für die Auswahl von Exoskeletten

Die verschiedenen Methoden zur Auswahl eines geeigneten Exoskeletts reichen von objektiven Ansätzen unter Verwendung von Datenbanken und Gewichtungsfaktoren bis hin zu eher subjektiven Bewertungen anhand von Checklisten und Visualisierungen (etwa [6–8]). Die verschiedenen Methoden zur Auswahl von Exoskeletten werden in *Drees et al.* [9] vorgestellt und beschrieben. Der Schwerpunkt der Methoden liegt dabei auf der generischen Empfehlung für den prinzipiellen Einsatz von Exoskeletten („Bei dieser Aufgabe kann ein Exoskelett unterstützen.“) und nicht auf einer wissensbasierten, individualisierten Auswahl des bestmöglichen Systems („Dieses spezifische Exoskelett hilft bei der Aufgabe am besten, weil...“). Aufgrund der Vielfalt der verwendeten Kriterien und Kategorien bleibt eine klare Orientierung für Entscheidungsträger schwierig, was den Bedarf an weiterer Forschung und Entwicklung in diesem Bereich unterstreicht. [9]

Ein großes Hindernis bei der Auswahl von Exoskeletten ist zudem der Mangel an Forschung zur Wirksamkeit an realen Arbeitsplätzen [10]. Während Feldstudien zunehmen, sind sie oft durch kleine Stichproben und subjektive Metriken eingeschränkt [11]. Ergonomische und biomechanische Bewertungen sowie die Analyse von Aufgaben- und Arbeitsplatzeigenschaften spielen eine entscheidende Rolle im Auswahlprozess, werden jedoch an realen Arbeitsplätzen selten ganzheitlich und gemeinsam erfasst. Der Studienansatz „Exoworkathlon“ zielt darauf ab, diese große Lücke zwischen Anwendung im Feld und Laborversuchen durch den Aufbau verschiedener realitätsnäher Parcours zu schließen und Exoskelette neutral zu bewerten [12]. Darüber hinaus wird häufig bereits vor der Testphase ein Exoskelett ausgewählt, wodurch ein wissensbasierter Auswahlprozess umgangen wird. Selbst bei Vergleichen verschiedener Exoskelette innerhalb von Feldstudien bleibt die Auswahl aufgrund der aufwendigen und subjektiven Testphasen schwierig (siehe zum Beispiel [13]).

2.2 Bewertung von Arbeitstätigkeiten zur Nutzung bei der Auswahl von Exoskeletten

Da Exoskelette den Mitarbeitenden bei unterschiedlichen Aufgaben unterstützen, helfen bestehende Methoden zur Bewertung manueller Arbeitstätigkeiten bei der Beschreibung möglicher Anwendungsfälle. Allerdings erlauben diese Aufgabenbeschreibungen nur eine grobe Zuordnung zum Exoskelett-Typ und vernachlässigen die spezifischen Bewegungen, Bewegungsdauern und Arbeitsumgebungen, die für jede Aufgabe einzigartig sind. Eine Vielzahl von „Pen-and-Paper“-Bewertungsmethoden sind verbreitet [14]. *Dahmen* und *Constantinescu* haben 36 der bestehenden Methoden gegenübergestellt und mit einem Punktesystem für die Anwendbarkeit in Bezug auf Exoskelette bewertet [15]. Sie grenzen die Auswahl nach der Bewertung auf folgende Methoden ein:

- LMM (Leitmerkmalmethode),
- EAWS UB/TB (European Assessment Worksheet upper/total body),
- REBA (Rapid Entire Body Assessment) und
- RULA (Rapid Upper Limb Assessment).

Die beschriebenen Bewertungsmethoden verfolgen alle das Ziel, Risiken für eine Überbelastung der Mitarbeitenden sowie Handlungspotenziale aufzuzeigen, weisen dabei jedoch unterschiedliche Stärken und Schwächen auf.

Alle Methoden errechnen einen Punktewert, der das Risiko für eine Überbelastung des Mitarbeitenden aufzeigt und die Notwendigkeit von Verbesserungsmaßnahmen benennt. Je höher der Risikowert ist, desto relevanter sind weitere Untersuchungen und Präventionsmaßnahmen, um das Gesundheitsrisiko zu senken. Eine genaue Handlungsempfehlung für mögliche Präventionsmaßnahmen bietet jedoch keine der Methoden. Demnach bleibt offen, ob und welches spezifische Exoskelett eine mögliche Maßnahme für den bewerteten Anwendungsfall darstellt.

Bei der Beschreibung vielfältiger Tätigkeiten zeichnet sich besonders die LMM aus, die für sechs verschiedene Belastungsarten ein differenziertes Formblatt zur Bewertung vorweist. Zusätzlich werden in der Beschreibung der Formblätter typische Tätigkeiten benannt, für die eine Bewertung mittels des entsprechenden Formblattes vorgesehen ist. Die EAWS-Methode ähnelt der LMM, bietet jedoch nur ein Blatt, auf dem verschiedene ergonomische Risikofaktoren und Körperregionen betrachtet werden. Je nach Anwendungsfall werden einzelne Teile ausgelassen. Beide Methoden sind jedoch für die Bewertung von Lasthandhabungen sowie erzwungenen Körperhaltungen anwendbar. Als Ergänzung zum EAWS untersuchte die Fondazione Ergo-MTM Italia, wie sich die ergonomische Risikobewertung bei der Verwendung des „Comau MATE“ und „Paexo Shoulder“ zur Unterstützung von Schulterbewegungen verändert und entwickelten ein angepasstes Arbeitsblatt für die Verwendung [16]. Hierbei wurden die prozentuale Verringerung der EAWS-Scores durch die Verarbeitung von im Labor gemessenen Muskelaktivitäten herangezogen. Da das Grundprinzip der Unterteilung einzelner Bewegungen erhalten bleibt, fehlt jedoch weiterhin die Betrachtung komplexer Bewegungsabfolgen inklusive der daraus resultierenden, individuellen biomechanischen Wirkung auf den einzelnen Mitarbeitenden.

Die RULA- und REBA-Methoden eignen sich insbesondere für die Bewertung von Körperzwangshaltungen und bieten somit ein eingeschränktes Anwendungsgebiet. Sie zeichnen sich durch eine grafische und schnelle Anwendung aus und bieten eine erste Abschätzung von physischen Belastungen. Die Körperhaltungen der einzelnen Körperteile werden übersichtlich in Piktogrammen dargestellt und für die verschiedenen Körperwinkel mit Punktwerten versehen. Unterschieden werden die beiden Methoden durch die Aufteilung der bewerteten Körperregionen. Während mit der RULA-Methode der Oberkörper bewertet werden kann, lassen sich mit der REBA-Methode Körperhaltungen des gesamten Körpers bewerten. Auch LMM und EAWS verwenden zur Veranschaulichung der zu bewertenden Körperhaltungen primär Piktogramme, nutzen jedoch keine Winkelangaben, sondern zeigen mögliche Start- und Endpositionen.

Im Vergleich zu aufwendigen Motion-Capture-Systemen sind die Methoden kostengünstig und an verschiedenen Arbeitsplätzen leicht anzuwenden [17]. Sie verursachen aber einen erheblichen Beurteilungsaufwand und bringen das Risiko verzerrter Ergebnisse durch die subjektive Betrachtung der Prozesse von Werker oder Beobachter mit sich und sind somit fehleranfällig [18]. Fast 30 % der Bewertungen sind fehlerhaft, wobei einige dieser Fehler schwerwiegend sind und die Bewertungsergebnisse vollständig ungültig machen [18].

Als Alternative werden für die Erfassung von Bewegungen und die anschließende Auswertung der Arbeitstätigkeiten im Rahmen von Exoskeletten Motion-Capture-Systeme eingesetzt (zum Beispiel [19–21]). Es existieren verschiedene Systeme, die auf mechanischen, optischen, magnetischen, akustischen oder inertia-

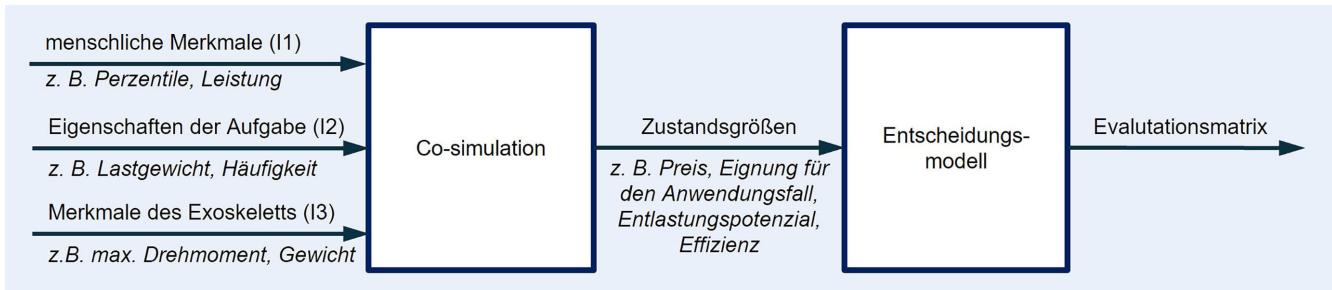


Bild 1. Allgemeiner Zusammenhang zwischen Inputfaktoren, Zustandsgrößen und Ergebnissen der Methode. *Grafik: LPS / PfF*

len Trackern basieren. Ihr gemeinsames Ziel ist die genaue Erfassung und Analyse menschlicher Bewegungsdaten in Echtzeit oder zur späteren Analyse. Diese Systeme bieten detaillierte Einblicke in die Biomechanik und Kinematik von Benutzern, die Exoskelette tragen, einschließlich Gelenkwinkeln, ausgeübten Kräften und Muskelaktivierungen. Bestehende Software, wie „emaWD“ [22], kann die erfassten Daten in eine Risikoanalyse auf der Grundlage von EAWS umwandeln. Motion-Capture-Ansätze haben jedoch Nachteile im hohen initialen Aufwand zur Vorbereitung der Messung sowie der Gefahr von Überdeckungen in beengten Arbeitsräumen, weswegen sie bisher meist in entsprechend ausgestatteten Laboren und nicht für Feldmessungen eingesetzt werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass verschiedene Ansätze die Modellierung von Aufgaben im Zusammenhang mit der Verbesserung der Ergonomie und der Einführung von Exoskeletten ermöglichen. Die Methoden sind zwar für die Bewertung des Belastungsrisikos an industriellen Arbeitsplätzen ausreichend, jedoch nicht feingliedrig genug für die Selektion passender Exoskelette. Informative-Motion-Capture-Ansätze sind dagegen im industriellen Umfeld zur Bewegungsanalyse aufgrund des Aufwandes nicht weit verbreitet. An dieser Stelle besteht eine große Informationslücke zwischen gelebter industrieller Praxis und benötigten Informationen für eine wissensbasierte Auswahl von Exoskeletten. Auch gibt es keine standardisierte Methode zur Beschreibung der Abfolge spezifischer Bewegungen, die eine ganzheitliche Arbeitsaufgabe bilden und bei der Auswahl eines spezifischen Systems helfen.

2.3 Eigenschaften von Exoskeletten

Um die Eigenschaften des Exoskeletts zu spezifizieren und in ein Auswahlhilfsmittel zu implementieren, sind Informationen zum Beispiel über Kraftkurven, Winkelbereiche und erreichbare Drehmomente erforderlich. Dabei unterscheiden sich die Exoskelette in ihren Kraftverläufen (zum Beispiel Kraftübertragung vom Oberarm zum Becken [23], vom Werkzeug in den Oberkörper [24] oder vom Werkzeug zum Boden [25]), translatorischen oder rotatorischen Freiheitsgraden und der Gestaltung der Benutzeroberfläche [26]).

Diese Unterschiede führen dazu, dass es derzeit keine standardisierten Testverfahren gibt, die eine vergleichende Bewertung der Unterstützung durch verschiedene Exoskelette ermöglichen [27]. Watterworth *et al.* haben eine Testumgebung entwickelt, um die Unterstützung durch vier passive Exoskelette zu quantifizieren und den Unterstützungsgrad in Abhängigkeit vom Schulterhebungswinkel zu schätzen [28]. Weitere Tests zur Bewertung des Drehmoments werden von Madinei *et al.* [29], Hartmann *et al.* [30] und Ito *et al.* [31] durchgeführt.

3 Konzeptionierung des wissensbasierten Ansatzes

Wie dargestellt, gibt es für die Auswahl von Exoskeletten an industriellen Arbeitsplätzen bereits verschiedene Instrumente und Methoden, die den Prozess unterstützen. Ein Vergleich der einzelnen Ergebnisse nach Anwendung der Methoden in unterschiedlichen Settings bleibt aber schwierig. Die Evaluation basiert bisher nur auf den physischen Implementierungen von Exoskeletten, wodurch Ergebnisse erst nach einer zeit- und kostenintensiven Implementierung gewonnen werden.

Die verschiedenen Methoden, Ergebnisse und Daten sind aber eine wichtige Grundlage für die Entwicklung eines neuartigen wissensbasierten Exoskelett-Auswahlwerkzeugs und bilden einen zu nutzenden Wissensspeicher. Inputfaktoren für den Bewertungs- und Auswahlprozess eines wissensbasierten Ansatzes sind vor allem die Merkmale des Menschen (I1), die die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Anwenders wie Anthropometrie (etwa Perzentil, Größe und Statur), Bewegungsmuster, Körperhaltungen und Arbeitsrhythmus adressieren, Aufgabeneigenschaften (I2), die arbeitsplatz- und prozessbezogene Eigenschaften wie Dynamik, Bewegungsumfang, Arbeitsfrequenzen, verwendete Werkzeuge oder unterschiedliche Gewichte von Lasten adressieren, und exoskelettale Merkmale (I3), die technische Eigenschaften physischer Unterstützungssysteme wie Unterstützungseigenschaften, Unterstützungsebenen, Betätigungsprinzipien, kraftleitende Strukturen und Materialsteifigkeit adressieren.

Als Ergebnis einer Interaktion zwischen diesen drei Inputs bestimmen charakteristische Zustandsgrößen die jeweilige Stützungssituation. Sie sind das Ergebnis eines Co-Simulationsmodells und stellen damit ein Zwischenergebnis dar. Die Zustandsgröße „Entlastungspotenzial“ ergibt sich beispielsweise aus dem Zusammenspiel der Aspekte der verschiedenen Inputfaktoren I1, I2 und I3. Ein Entscheidungsmodell soll die Bewertung und Auswahl von Exoskeletten mit definierten Stützeigenschaften in Form einer Evaluationsmatrix unterstützen. **Bild 1** veranschaulicht schematisch die Beziehung zwischen den Eingangs faktoren, den Zustandsgrößen und der Bewertungsmatrix innerhalb dieses Ansatzes als Black-Box-Darstellung.

4 Untergliederung der Arbeitsaufgaben

Zum Schließen der Informationslücke lassen sich die spezifischen Merkmale zur Evaluation von Exoskeletten heranziehen. De Bock *et al.* [4] beschreiben dazu die Ergebnisse verschiedener Validierungen für Exoskelette und vor allem, welche spezifische Merkmale adressiert werden (wie etwa bewegte Massen, Arbeitshöhe, Dynamik der Tätigkeit und Körperwinkel). Diese Merkmale

Tabelle. Feingliedrige Unterteilung manueller Tätigkeiten.

Belastungsart (LMM)	Unterteilung	Spezifische Arbeitsposition
Heben, Halten und Tragen einer Last $\geq 3\text{kg}$	Dynamisches Heben und Absenken einer Last	<ul style="list-style-type: none"> - Vom Boden - Auf Hüfthöhe - Auf Schulterhöhe
	Statisches Heben einer Last	<ul style="list-style-type: none"> - Vom Boden - Auf Hüfthöhe - Auf Schulterhöhe - Über Schulterhöhe (=Überkopfarbeit)
	Tragen einer Last	<ul style="list-style-type: none"> - Auf Hüfthöhe - Auf Schulterhöhe - Seitlich des Körpers
Körperzwangshaltung	Arbeit in stehender, sitzender, kniender, gebeugter oder gehockter Zwangshaltung	<ul style="list-style-type: none"> - Auf Boden - Auf Hüfthöhe - Auf Schulterhöhe - Über Schulterhöhe (=Überkopfarbeit)
Ziehen und Schieben einer Last	-	-
Körperfortbewegung	-	-

ermöglichen eine genauere Beschreibung der Tätigkeit und eine genauere Auswahl der unterstützten Körperregion.

Exoskeletthersteller geben jedoch häufig nur eine allgemeine Beschreibung unterstützter Körperhaltungen oder große Winkelbereiche an, in denen eine Unterstützung erfolgt. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der Systeme untereinander und die Auswahl des am besten passenden Exoskelettes. Folglich lassen sich zwei Handlungsschwerpunkte identifizieren:

1. Besseres Verständnis über Unterstützungsbereiche von Exoskeletten in unterschiedlichen Bewegungsszenarien: Derartige Versuchsaufbauten lassen sich zum Beispiel in [28–31] finden.
2. Feingliedrigere Unterteilung der Arbeitstätigkeiten. Diese werden im Folgenden betrachtet.

Für die feingliedrigere Unterteilung lässt sich die Norm DIN EN 1005–4 nutzen, in welcher Körperhaltungen und Bewegungen in einem Zonenmodell anhand verschiedener Winkel der Körperteile betrachtet werden. Diese Einteilung erfolgt für die einzelnen Freiheitsgrade von Kopf, Rumpf, Schulter, Ellenbogen, Handgelenk und Kniegelenk [32].

Für die Bewertung werden die drei Körperwinkelkategorien für die definierten Winkelbereiche zusätzlich anhand der Bewegungsfrequenz unterschieden. Es werden statische Haltungen sowie nieder- und hochfrequente (= dynamische) Bewegungen unterschieden. Durch diese zusätzliche Unterteilung können dieselben Winkelbereiche abhängig von der Häufigkeit der Bewegung unterschiedlich akzeptabel für das Gesundheitsrisiko des Mitarbeitenden sein. Diese Merkmale können mit den Anwendungsfällen der arbeitswissenschaftlichen Methoden kombiniert werden, wodurch sich spezifischere Aufgabeneinteilungen bilden lassen.

Der Ausgangspunkt der Unterteilung sind die physischen Belastungsfälle der LMM. Ausgehend von diesen findet eine weitere Unterteilung insbesondere anhand der auftretenden Körperwinkel und der Dynamik statt. Diese ist in der **Tabelle** dargestellt.

Zusätzliche Variationen der vorgeschlagenen Einteilung lassen sich durch beliebig feiner werdende Unterteilungen wie etwa folgende Spezifikationen abbilden:

- einhändig / zweihändig
- körpernah / körperfern
- Objektgröße (klein / groß)

Die LMM-Anwendungsfälle „Ganzkörperkräfte“ und „Manueller Arbeitsprozess“ werden nicht weiter betrachtet und sind kein alleinstehender Anwendungsfall für den Selektionsprozess, da die Varianz möglicher Tätigkeiten sehr groß ist. Eine detaillierte Beschreibung über einheitliche charakteristische Körperwinkel ist nicht möglich. Zusätzlich lassen sich beide Fälle nach der Definition aller weiteren Anwendungsfälle durch die Kombination von mehreren dieser beschreiben.

Den entsprechenden Anwendungsfällen beziehungsweise Bewegungen werden charakteristische Körperwinkel zugeordnet, wie es im Folgenden beispielhaft anhand des dynamischen Hebens und Absenkens einer Last auf Hüfthöhe erfolgt. Bei diesem wird sowohl die Greifposition als auch die Objektgröße unterschieden, damit eine notwendige Trennschärfe vorliegt. Es zeichnet sich durch häufige Wiederholungen der Tätigkeit aus. Bei allen Anwendungsfällen auf Hüfthöhe sind die Knie nahezu gerade oder leicht gebeugt (0° bis 10°), da die Tätigkeiten im Stehen stattfinden. Werden große Objekte körpernah gehoben, werden die Schultern seitlich abgespreizt (Abduktion $> 20^\circ$), maximal leicht gebeugt (Flexion $< 20^\circ$) und aufgrund der Größe des Objekts nach außen rotiert ($< 0^\circ$). Der Rumpf ist nahezu aufrecht (-10° bis 20°). Eine Tätigkeit für diesen Anwendungsfall ist beispielsweise das Abheben langer ebener Platten vom Arbeitstisch einer Säge oder das Anheben langer Rohre.

Im Unterschied dazu, wenn sich ein kleines Objekt in einer körperfernen Greifposition auf Hüfthöhe befindet, ist der Rumpf des Mitarbeitenden stark nach vorne gebeugt ($> 20^\circ$) und die Ellenbogen sind gestreckt (Flexion $< 60^\circ$). Die Schultern sind je nach Entfernung bis zu 90° nach vorne gebeugt und eher nach innen rotiert ($> 0^\circ$). Eine Tätigkeit für diesen Anwendungsfall ist

Kategorie				Heben, Halten, Tragen einer Last $\geq 3\text{kg}$
Anwendungsfall Beschreibung				Dynamisches Heben einer Last auf Hüfthöhe (körpernah/großes Objekt)
Körperteil	Gelenk	Bewegung	Bewegungsbereich	
Kopf	Halswirbelsäule	Beugen/Strecken	-40° bis 85°	
		Neigen	-50° bis 50°	
		Drehen	-80° bis 80°	
Arme	Schultergelenk	Beugen/Strecken	-40° bis 170°	Beugen < 20°
		Abspreizen/Heranziehen	-180° bis 40°	Abspreizen < 20°
		Rotieren	-70° bis 60°	Drehen < 0°
	Ellenbogen-gelenk	Beugen/Strecken	-10° bis 150°	
		Drehen	-90° bis 90°	
	Handgelenk	Beugen/Strecken	-80° bis 60°	
		Neigen	-40° bis 20°	
Rumpf	Brust-Lendenwirbelsäule	Beugen/Strecken	-60° bis 85°	Beugen/Strecken -10° bis 20°
		Neigen	-40° bis 40°	
		Drehen	-40° bis 40°	
Beine	Kniegelenk	Beugen/Strecken	0° bis 150°	Beugen/Strecken 0° bis 10°
Rangfolge der charakteristischen Körperwinkel				1. Abspreizen der Schultern < 20° 2. Beugen/Strecken der Schultern < 20° 3. Außenrotation der Schultern > 0° 4. Beugen/Strecken des Rumpfes -10° bis 20°
Dauer der Tätigkeit				Kurzzeitig, wenige Sekunden
Belastete Körperregionen				Schultern, Ellenbogen
Anwendungsbeispiel				Heben großer Pakete oder Kisten nah am Körper

Bild 2. Auszug aus der Übersicht der definierten Anwendungsfälle für das körpernahe, dynamische Heben eines großen Objektes auf Hüfthöhe.
Grafik: LPS / PFF

beispielsweise das Entnehmen oder Ablegen kleiner Kartons auf entfernten Paletten. **Bild 2** stellt die Tätigkeitsbeschreibung dar. Über die Rangfolge der charakteristischen Körperwinkel wird die Abgrenzung zu anderen Anwendungsfällen hervorgehoben.

5 Nutzen der feingliedrigen Bewegungsbeschreibung in einer Wissensdatenbank

Die feingliedrige Bewegungsbeschreibung in einer Wissensdatenbank bietet signifikante Vorteile für die präzise Evaluierung und Auswahl von Exoskeletten in industriellen Anwendungen. Für die Auswahl eines geeigneten Exoskeletts sind nicht primär arbeitswissenschaftliche Kennwerte (etwa aus LMM oder EAWS) relevant, sondern vielmehr die reinen Bewegungsdaten des jeweiligen Nutzers. Diese Daten geben Aufschluss über die spezifischen Bewegungen, Bewegungsdauern und Arbeitsumgebungen, die für jede Aufgabe einzigartig sind. Durch die detaillierte Erfassung und Simulation dieser Bewegungen kann die Eignung eines Exoskeletts für bestimmte Tätigkeiten präzise bewertet werden.

Für rasche, realitätsnahe Anwendungen ist es erforderlich, den Aufwand bestehender Motion-Capture-Verfahren zu reduzieren, die zwar die genauesten Ergebnisse ermöglichen, aber in vielen Arbeitsumgebungen aus unterschiedlichen Randbedingungen nicht praktikabel sind. Zeitgleich muss die Informationslücke zu bestehenden arbeitswissenschaftlichen Methoden zur Bewertung von Arbeitsplätzen geschlossen werden. Die vorgestellte feinglied-

ige Unterteilung und die Spezifizierung der Arbeitsaufgaben können diese Lücke schließen. Sie erlaubt es zum Beispiel, die Kraft-/Momentencharakteristik in der Drehmomentunterstützung inklusive des auftretenden Hystereseverhaltens und der ausgeführten Arbeitsbewegung anhand der Körperwinkel zu überlappen und zu analysieren. Dies wird in **Bild 3** verdeutlicht [33].

Ebenso gibt es Systeme, die bewusst Kennkurven vorgeben wollen, zum Beispiel bei „exoIQ“ mit den dort genannten Presets [34]. Mit zusätzlichen Informationen zu den aufgetretenen Kräften kann der Arbeitsbereich weiter eingeschränkt werden und über verschiedene Hysteresekurven ein passendes Exoskelett (noch ohne Simulation) ausgewählt werden. Über die Modellierung der Arbeitsaufgaben als Standardelemente mithilfe von Tools wie „ema“ [22] und den daraus abgeleiteten Standardbewegungsabläufen lässt sich zukünftig eine genauere Co-Simulation mit biomechanischen Vorgängen durchführen. Dabei werden individuelle Nutzerprofile zusammen mit den Arbeitsbeobachtungen und den daraus abgeleiteten Standardbewegungen genutzt, um die Gelenkwinkel und auftretenden Lasten sowie weitere Parameter der Arbeitsaufgabe und des Arbeitsumfelds zu simulieren, sodass diese wiederum als Eingangsgröße für eine biomechanische Simulation dienen können. Diese Integration soll eine umfassendere und realistischere Abbildung der Arbeitsprozesse ermöglichen, was zu einer verbesserten Analyse und Auswahl von Exoskeletten führt.

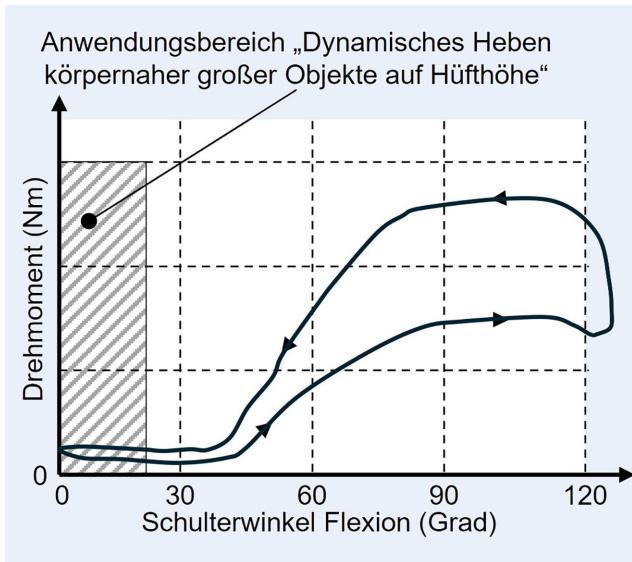


Bild 3. Überlappung einer beispielhaften Unterstützung eines Exoskeletts und der genutzten Arbeitstätigkeit.

Grafik: LPS / PfF in Anlehnung an de Bock et al. [33]

6 Fazit

Dieser Beitrag beleuchtet die Bedeutung einer feingliedrigen Bewegungsbeschreibung in der Wissensdatenbank für die präzise Auswahl von Exoskeletten in industriellen Anwendungen.

Hinsichtlich der ersten Forschungsfrage nach dem Status Quo zur Auswahl eines spezifischen Exoskelettes lässt sich festhalten, dass aktuell ein subjektiver Auswahlprozess dominiert, der stark von einzelnen Empfehlungen und Versprechungen der Hersteller beeinflusst wird. Ergonomische Bewertungen und die Anpassung an spezifische Arbeitsaufgaben werden oft vernachlässigt, was zu einer suboptimalen Implementierung von Exoskeletten führt.

Diese Untersuchung leitet daher ein Konzept ab, wie ein Co-Simulationsmodell unter Berücksichtigung menschlicher Merkmale, Charakteristiken von Exoskeletten und detaillierter Tätigkeitsbeschreibung auf Grundlage einzelner Bewegungen und unter Zuhilfenahme von Tools wie ema den Auswahlprozess erheblich verbessern kann.

Bezüglich der zweiten Forschungsfrage, welche den Fokus auf die Erfassung, Bewertung und Nutzung von Bewegungen für den simulativen Vergleich legt, wurde ein Vorgehen zum Schließen der Informationslücke zwischen detaillierten Motion-Capture-Ansätzen und gängigen arbeitswissenschaftlichen Methoden wie LMM, EAWS oder RULA vorgestellt. Dieses Vorgehen bildet die Basis für die Integration der Bewegungsdaten in ein Co-Simulationsmodell. Ebenso führt dies zu einer besseren Überlappung des Unterstützungsverhaltens von Exoskeletten mit der durchgeführten Tätigkeit und somit zu einer verbesserten Eignung und Akzeptanz der Exoskelette am Arbeitsplatz.

Für zukünftige Forschungsschwerpunkte bietet sich die Aufnahme und Implementierung der Standard-Bewegungsdatenbank an. Ebenso sollte untersucht werden, wie mit geringem Aufwand Bewegungsdaten im Feld gesammelt werden können, gegebenenfalls über die Nutzung von Tiefenkameras und Methoden zur Abschätzung der Gelenkpositionen mittels künstlicher Intelligenz, wie zum Beispiel in [35] aufgezeigt. Ebenso muss das aktuell als Black Box dargestellte Co-Simulationsmodell, dass die

Bewegungsdaten mit den anderen Inputfaktoren geeignet koppelt, spezifiziert werden.

Eine potenzielle Limitation des Beitrags ist die bisher geringe Verfügbarkeit detaillierter Bewegungsdaten und die Notwendigkeit umfangreicher empirischer Studien, um die vorgeschlagenen Methoden weiter zu validieren. Insgesamt liefert diese Arbeit jedoch einen weiteren relevanten Baustein zur Umsetzung einer gezielten, flächendeckenden Einführung industrieller Exoskelette an verschiedenen Arbeitsplätzen.

FÖRDERHINWEIS

Diese Forschungsarbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft – DFG (Projektnummer 524694954) und dem Österreichischen Wissenschaftsfonds – FWF (Projektnummer: I 6623) im Rahmen des Forschungsprojekts „Wissensbasierte Planung für den Einsatz von Exoskeletten (ExoExpert)“ gefördert. Die Autoren danken der DFG und der FWF für die Förderung und Ermöglichung der Forschung.

L iteratur

- [1] Looze, M. P. de; Bosch, T.; Krause, F. et al.: Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59 (2016) 5, pp. 671–681
- [2] Exoskeleton Report: Exoskeleton Catalog Archives – Exoskeleton Report. Stand: 2024. Internet: [exoskeleton-report.com/product-category/exoskeleton-catalog/](http://exoskeletonreport.com/product-category/exoskeleton-catalog/). Zugriff am 12.08.2024
- [3] Ott, O.; Ralfs, L.; Weidner, R.: Framework for qualifying exoskeletons as adaptive support technology. *Frontiers in robotics and AI* 9 (2022), #951382, doi.org/10.3389/frobt.2022.951382
- [4] Bock, S. de; Ghillebert, J.; Govaerts, R. et al.: Benchmarking occupational exoskeletons: An evidence mapping systematic review. *Applied ergonomics* 98 (2022), #103582, doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103582
- [5] Gillette, J. C.; Saadat, S.; Butler, T.: Electromyography-based fatigue assessment of an upper body exoskeleton during automotive assembly. *Wearable technologies* 3 (2022), e23, doi.org/10.1017/wtc.2022.20
- [6] Feldmann, C.; Kaupe, V.; Lucas, M.: A Procedural Model for Exoskeleton Implementation in Intralogistics. In: Kersten, W.: Data science and innovation in supply chain management. *Proceedings of the HICL 29* (2020), pp. 113–151, doi.org/10.15480/882.3113
- [7] Ralfs, L.; Hoffmann, N.; Weidner, R.: Approach of a Decision Support Matrix for the Implementation of Exoskeletons in Industrial Workplaces. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Raatz, A. (Hrsg.): *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*. Cham: Springer International Publishing 2022, pp. 165–176
- [8] Kerangueven, L.; Atain-Kouadio, J.-J.; Turpin-Legendre, E.: Acquisition and integration of exoskeletons in establishments. Guide for safety professionals. Stand: 2020
- [9] Drees, T.; Luttmmer, J.; Nagarajah, A.: A framework for the systematic selection of occupational exoskeletons. *Procedia CIRP* 119 (2023), pp. 1134–1139
- [10] Golabchi, A.; Riahi, N.; Fix, M. et al.: A framework for evaluation and adoption of industrial exoskeletons. *Applied ergonomics* 113 (2023), #104103
- [11] Crea, S.; Beckerle, P.; Looze, M. de et al.: Occupational exoskeletons: A roadmap toward large-scale adoption. Methodology and challenges of bringing exoskeletons to workplaces. *Wearable technologies* 2 (2021), e11, doi.org/10.1017/wtc.2021.11
- [12] Kopp, V.; Holl, M.; Schalk, M. et al.: Exoworkathlon: A prospective study approach for the evaluation of industrial exoskeletons. *Wearable technologies* 3 (2022), e22, doi.org/10.1017/wtc.2022.17
- [13] Di Natali, C.; Poliero, T.; Fanti, V. et al.: Dynamic and Static Assistive Strategies for a Tailored Occupational Back-Support Exoskeleton: Assessment on Real Tasks Carried Out by Railway Workers. *Bioengineering* (Basel, Switzerland) 11 (2024) 2, #172, doi.org/10.3390/bioengineering11020172

- [14] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: MEGAPHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Stand: 2019. Internet: www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2333.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am 12.08.2024
- [15] Dahmen, C.; Constantinescu, C.: Methodology of Employing Exoskeleton Technology in Manufacturing by Considering Time-Related and Ergonomics Influences. *Applied Sciences* 10 (2020) 5, #1591
- [16] Fondazione Ergo-MTM Italia: Exoskeleton certification. Stand: 2020. Internet: www.eaws.it/exoskeleton-certification/. Zugriff am 12.08.2024
- [17] Takala, E.-P.; Pehkonen, I.; Forsman, M. et al.: Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scandinavian journal of work, environment & health* 36 (2010) 1, pp. 3–24
- [18] Diego-Mas, J.-A.; Alcaide-Marzal, J.; Poveda-Bautista, R.: Errors Using Observational Methods for Ergonomics Assessment in Real Practice. *Human factors* 59 (2017) 8, pp. 1173–1187
- [19] Govaerts, R.; Bock, S. de; Stas, L. et al.: Work performance in industry: The impact of mental fatigue and a passive back exoskeleton on work efficiency. *Applied ergonomics* 110 (2023), #104026
- [20] McFarland, T. C.; McDonald, A. C.; Whittaker, R. L. et al.: Level of exoskeleton support influences shoulder elevation, external rotation and forearm pronation during simulated work tasks in females. *Applied ergonomics* 98 (2022), #103591
- [21] Bennett, S. T.; Han, W.; Mahmud, D. et al.: Usability and Biomechanical Testing of Passive Exoskeletons for Construction Workers: A Field-Based Pilot Study. *Buildings* 13 (2023) 3, #822
- [22] ema Software Suite: Ergonomics – ema Software Suite. Stand: 2024. Internet: imk-ema.com/en/fields-of-application/ergonomics/. Zugriff am 12.08.2024
- [23] Otten, B.; Weidner, R.; Linnenberg, C.: Leichtgewichtige und inhärent biomechanisch kompatible Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe. In: Weidner, R. (Hrsg.): 2. transdisziplinäre Konferenz „Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen“ Hamburg 2016, S. 495–505
- [24] Weidner, R.; Argubi-Wollesen, A.; Otten, B. et al.: Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe in der industriellen Produktion. Arbeit in komplexen Systemen – digital, vernetzt, human?! Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Kongress 62. 2016 Aachen. Dortmund : GfA-Press, 2016, B.3.11, S. 1–6
- [25] Young, A. J.; Ferris, D. P.: State of the Art and Future Directions for Lower Limb Robotic Exoskeletons. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 25 (2017) 2, pp. 171–182
- [26] Otten, B.; Hoffmann, N.; Weidner, R.: Towards Adaptive System Behavior and Learning Processes for Active Exoskeletons. In: Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Hintze, W. et al. (Hrsg.): Production at the leading edge of technology. Berlin, Heidelberg: Springer 2021, pp. 476–484
- [27] Golabchi, A.; Chao, A.; Tavakoli, M.: A Systematic Review of Industrial Exoskeletons for Injury Prevention: Efficacy Evaluation Metrics, Target Tasks, and Supported Body Postures. *Sensors* 22 (2022) 7, #2714, doi.org/10.3390/s22072714
- [28] Watterworth, M. W. B.; Dharmaputra, R.; Porto, R. et al.: Equations for estimating the static supportive torque provided by upper-limb exoskeletons. *Applied ergonomics* 113 (2023), #104092
- [29] Madinei, S.; Kim, S.; Park, J.-H. et al.: A novel approach to quantify the assistive torque profiles generated by passive back-support exoskeletons. *Journal of biomechanics* 145 (2022), #111363
- [30] Hartmann, V. N.; M. Rinaldi, D. de; Taira, C. et al.: Design of a torque measurement unit for upper limbs industrial exoskeletons. 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2021, pp. 1005–1010
- [31] Ito, T.; Ayusawa, K.; Yoshida, E. et al.: Evaluation of active wearable assistive devices with human posture reproduction using a humanoid robot. *Advanced Robotics* 32 (2018) 12, pp. 635–645
- [32] DIN EN 1005–4: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung. Ausgabe 2009
- [33] Bock, S. de; Rossini, M.; Lefebvre, D. et al.: An Occupational Shoulder Exoskeleton Reduces Muscle Activity and Fatigue During Overhead Work. *IEEE transactions on bio-medical engineering* 69 (2022) 10, pp. 3008–3020
- [34] exoIQ GmbH: Homepage. Stand: 2024. Internet: www.exoiq.com. Zugriff am 12.08.2024
- [35] Eversberg, L.; Sohst, C.; Lambrecht, J.: Assistenzsystem zur Verbesserung der Ergonomie/Assistance system to improve ergonomics – Preventing musculoskeletal disorders in manufacturing with artificial intelligence. *wt Werkstattstechnik online* 112 (2022) 09, S. 596–600. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien



Tobias Drees, M.Sc.

drees@lps.rub.de

Tel. +49 234 32-26951

Foto: Autor

Prof. Dr. Bernd Kuhlenkötter

kuhlenkoetter@lps.rub.de

Tel. +49 234 32-26310

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Produktionsysteme

Industriestr. 38c, 44894 Bochum

www.lps.ruhr-uni-bochum.de

Prof. Dr. Robert Weidner

Tel. +43 512 507-62800

robert.weidner@uibk.ac.at

Helmut-Schmidt-Universität

Laboratorium Fertigungstechnik

Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Universität Innsbruck

Professur für Fertigungstechnik

Institut für Mechatronik

Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck

www.uibk.ac.at/de/mechatronik/fertigungstechnik

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)