

## Transparenz für den Einsatz von Exoskeletten als arbeitsergonomische Maßnahme

# Digitale Arbeitsmodelle und Methoden

M. Tröster, M. Holl, R. Rack, U. Daub, G. Müller, U. Schneider, T. Bauernhansl

**ZUSAMMENFASSUNG** Physisch anspruchsvolle Tätigkeiten verursachen auf die Dauer muskuloskeletale Beschwerden. Fachkräfte sind daher schwierig zu finden und zu halten. In diesem Beitrag werden Modelle und Methoden aus der digitalen Ergonomie zur effizienten und ganzheitlichen Planung von manueller Arbeit und zum Einsatz von Exoskeletten auf zwei Ebenen vorgestellt. Damit können ganzheitliche ergonomische sowie detaillierte biomechanische Effekte von Exoskeletten transparent gemacht werden.

### STICHWÖRTER

Digitalisierung, Mensch und Technik, Logistik

### Digital work models and methods – Transparency for the use of occupational exoskeletons as an ergonomic measure

**ABSTRACT** Physically strenuous activities cause musculoskeletal complaints over time and prevent skilled labour access and retention. This article presents models and methods for digital ergonomics for the efficient and holistic planning of manual labour and the use of exoskeletons on two levels. This allows for transparency about holistic ergonomic and exoskeletons detailed biomechanical effects.

## 1 Einleitung

Tägliche körperliche Belastungen, wie repetitive Tätigkeiten, das Tragen und Heben von schweren Lasten oder statische Haltearbeiten in nicht ergonomischen Positionen, sind nach wie vor Alltag im industriellen Kontext. Über einen kurzen Zeitraum können Belastungen durch Zwangshaltungen vom Körper gut ausgeglichen werden. Wiederholen sich diese Belastungen jedoch regelmäßig in zu kurzen Abständen, steigt die Beanspruchung auf den Muskel-Skelett-Apparat schnell an, da die Pausen zu kurz für eine vollständige Erholung des Muskels sind. Auch bei statischen Zwangshaltungen ist die Muskulatur durch die anhaltende Kontraktion schnell unterversorgt und ermüdet. Ein ermüdeten Muskel kann aber seine Stützkraft nicht mehr vollständig aufbringen, wodurch die Belastung auf die passiven Strukturen (wie Knochen, Knorpel, Kapsel-Bandapparat) und damit die Gefahr einer dauerhaften Schädigung ansteigt [1]. Diese Belastungen können zu Muskel-Skelett-Erkrankungen führen.

Studien zur Arbeitsergonomie zeigen, dass Erkrankungen des Muskel-Skelett-Apparats häufig zu Arbeitsausfällen führen. Dabei sind Erkrankungen am Muskel-Skelett-Apparat mit 25,5 % der häufigste Ausfallgrund vor psychischen Erkrankungen (18,8 %) [2]. Der Rücken, vor allem der untere Rücken, ist am häufigsten davon betroffen [3]. Die Krankheitsausfälle wirken sich direkt auf Unternehmen und indirekt auf die gesamte Wirtschaft aus. Angesichts des demografischen Wandels und des steigenden Renteneintrittsalters nimmt die Bedeutung der physischen Ergonomie am Arbeitsplatz zu. Somit steigt der Bedarf an eine fähigkeitsgerechte Arbeitsgestaltung sowie an die prospektive Berücksichtigung leistungsgewandelter Mitarbeitender durch ergonomische

Maßnahmen bereits in den frühen Phasen der Arbeitsgestaltung [4].

Nach dem deutschen Arbeitsschutzgesetz sind Gefahren eines Arbeitsplatzes direkt zu substituieren [5]. Ist dies nicht möglich, empfiehlt die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) nach dem TOP-Prinzip (Technische vor Organisatorischen vor Personenbezogenen Maßnahmen) zu handeln [6]. Manche Arbeitsplätze können nicht mit technischen oder organisatorischen Maßnahmen, etwa dem Einsatz von Robotern, ergonomischer gestaltet werden. Aufgrund physisch anspruchsvoller Tätigkeit mit komplexer Ausführung, enormer Anpassungsnotwendigkeit oder aus Kostengründen können diese Arbeiten nur von Menschen geleistet werden. Diese Tätigkeiten erfordern den Einsatz individueller Unterstützungssysteme, um den menschlichen Bewegungsapparat zu entlasten. Sind keine technischen oder organisatorischen Maßnahmen zur Verbesserung des Arbeitsplatzes möglich, können sogenannte arbeitsergonomische oder industrielle Exoskelette als personenbezogene Maßnahme eingesetzt werden, um arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen vorzubeugen.

Zudem sind solche Systeme auch eine Möglichkeit, leistungsgewandelte Mitarbeitende im Rahmen von Inklusion und Wiedereingliederung zu unterstützen [7]. Die Entlastungswirkung beim Tragen eines Exoskeletts für gewisse Tätigkeiten in den ausgewiesenen Körperbereichen konnte bereits in Laborstudien nachgewiesen werden [8, 9]. Bisher können nur wenige valide Aussagen zu Nebeneffekten, die eventuell durch das Tragen von Exoskeletten verursacht werden, getroffen werden. Des Weiteren sind Studien in stärker arbeitsplatzbezogenen Messumfeldern

notwendig, um die biomechanischen Anwendungsspezifika besser zu verstehen [8, 10].

Im Rahmen der Digitalisierung und der von der europäischen Kommission beschriebenen Industrie 5.0 gewinnt die prospektive und retrospektive Arbeitsplatzgestaltung mithilfe digitaler Methoden und Modelle für eine menschenzentrierte Arbeit der Zukunft immer mehr an Relevanz [11]. Eine Möglichkeit, ganzheitliche Auswirkungen von Exoskeletten zu objektivieren, bieten digitale biomechanische Menschmodelle [12–14]. Bisher sind die Analysen mit digitalen Menschmodellen noch sehr zeitintensiv und komplex. Man verspricht sich jedoch von den aufkommenden Technologien, wie der markerlosen Bewegungserfassung [15] und parametrisierbaren Bewegungserzeugungen mit KI-Ansätzen [16], eine deutliche Effizienzsteigerung. Des Weiteren können durch komplexe Fertigungs-, Fabrik- und Montagesimulationen manuelle Arbeitsplätze in Kombination mit Produktivitätsaspekten untersucht und objektiv bewertet und optimiert werden. Die Einbindung von Exoskeletten als ergonomische Maßnahme in diesen digitalen Planungs- und Optimierungsprozess ist ein Ziel des Forschungsprojektes „DigitalExonomics“ [17], und soll in diesem Beitrag exemplarisch beschrieben werden.

## 2 Digitale Menschmodelle

Anhand digitaler arbeitswissenschaftlicher Menschmodelle können äußere Einflüsse auf ein Arbeitssystem objektiv und visuell abgebildet werden. Zur ergonomischen Arbeitsgestaltung und Anwendung von Exoskeletten werden hier Menschmodelle auf zwei Betrachtungsebenen angewendet, um sowohl ganzheitliche Effekte in der Arbeitsplatz- und Prozessgestaltung als auch detaillierte biomechanische Beanspruchungseffekte abzubilden und zu verstehen. Im Folgenden werden das Menschmodell „ema“ einer Arbeitsplanungs- und Simulationssoftware (ema Work Designer) und das biomechanische Menschmodell AnyBody genauer erläutert.

### 2.1 Digitale Arbeitsplatz- und Prozessmodellierung

„emaWD“ (ema Work Designer) ist eine Planungs- und Simulationssoftware mit dem Menschmodell ema (Editor menschlicher Arbeit). Die Software bietet dreidimensionale Modellierungsmöglichkeiten von manuellen Tätigkeiten und die darauf basierende zeitwirtschaftliche und ergonomische Bewertung [18]. Die Bewegungen des Menschmodells können hochalgorithmisch generiert werden. Sie entstehen aus der eigeninitiativen Bewegung des Menschmodells und sind, anders als bei vielen anderen Mehrkörpermodellen, nicht zwangsläufig durch eine zuvor generierte Bewegungsaufnahme vorgegeben. Sie werden ausgewählt aus einer Bibliothek von Bewegungsrichtungen, zeitlich zugeordnet und Objekten zugewiesen. Die Bibliothek aus Bewegungsrichtungen wird nach dem Bottom-Up-Prinzip entwickelt, das heißt, Bauteile werden stufenweise zu immer komplexeren Arbeitsabläufen kombiniert [19].

Mithilfe integrierter Ergonomiebewertungsverfahren wie etwa EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet) und zusätzlichen Zeitanalyseverfahren können industrielle Arbeitsumgebungen ergonomisch bewertet, plausibilisiert und dokumentiert werden. So kann in emaWD eine Arbeitsumgebung geplant und gestaltet werden. Im Anschluss werden Tätigkeiten simuliert und visuali-

siert und abschließend bewertet. Zuletzt werden sie dokumentiert und zur Abstimmung mit Stakeholdern verwendet [20].

### 2.2 Biomechanische Menschmodellierung mit AnyBody

Das Menschmodell AnyBody ist ein rigides Mehrkörper-Muskel-Skelett-Modell, mit dem die Beanspruchung auf den menschlichen Körper in belastenden Arbeitsszenarien ergonomisch analysiert werden kann [21]. Basierend auf zahlreichen Literatur-, Probandendaten und Kadaverstudien über eine zentral verwaltete Modellierungsbibliothek werden die einzelnen Körperbereichsmodelle mit anatomisch detaillierten Muskelsträngen und Körpersegmenten aufgebaut. Über Vergleichs- und Simulationsstudien wird das Menschmodell fortlaufend wissenschaftlich validiert und verifiziert [22, 23].

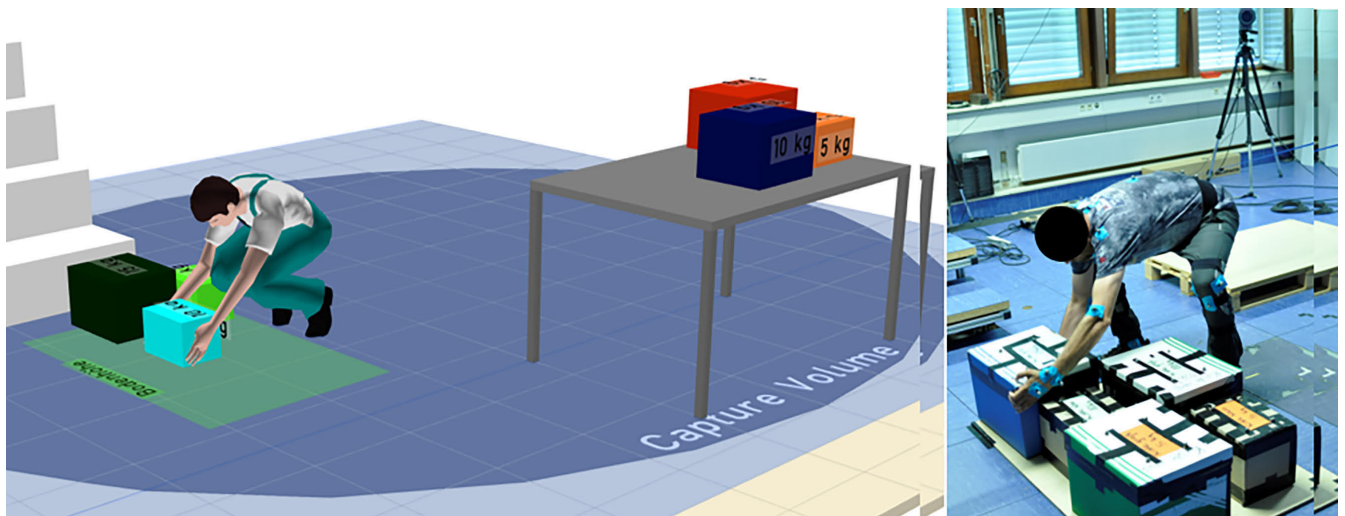
Mit anthropometrischen Daten, den erfassten Bewegungsdaten und dem Einbinden extern interagierender Systeme (zum Beispiel Exoskelette durch mögliche Integration von externen CAD-Daten) kann die Reaktion des Muskel-Skelett-Apparats in einer Mensch-Umwelt-Interaktion untersucht werden. Die internen Gelenkkräfte und -momente können durch implementierte Bewegungsgleichungen und bekannte Segmentmassen in ihrer Dynamik berechnet werden [24]. Vor allem durch die Berücksichtigung von Muskeln in der Modellierung lassen sich auftretende Kompressions- und Strukturkräfte in den menschlichen Gelenken ermitteln und mitberücksichtigen [25].

## 3 Anwendung auf manuelles LogistikszENARIO

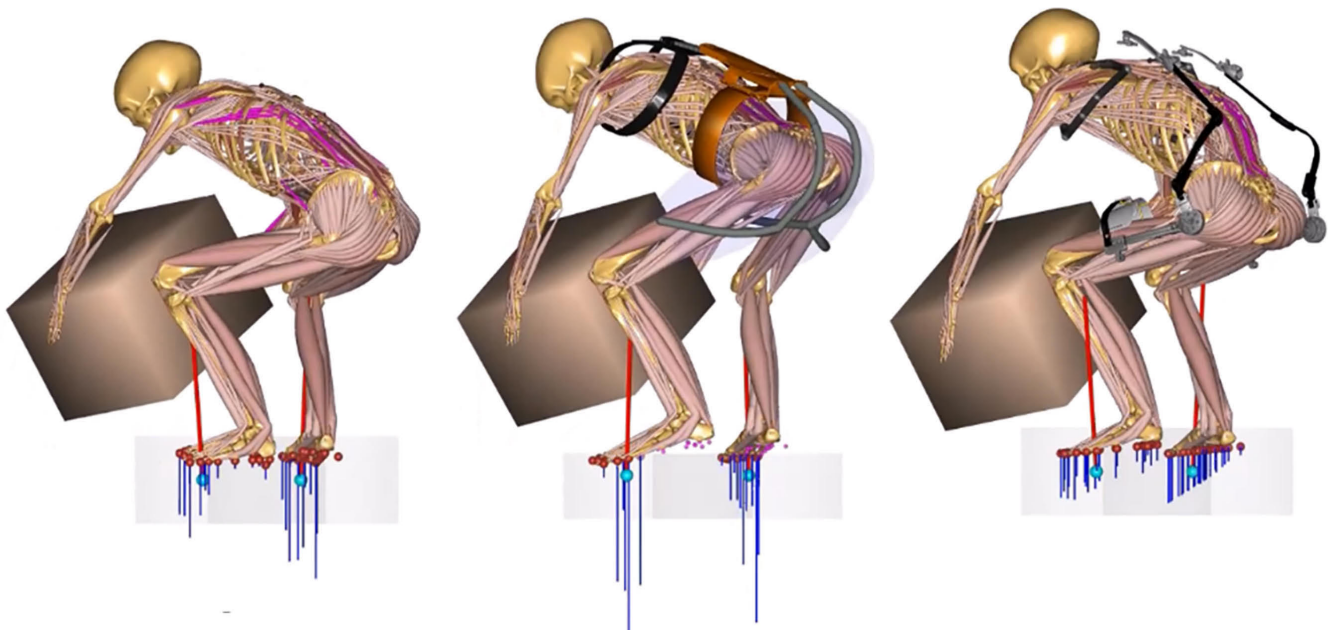
Seit 2019 testet DB Schenker in Deutschland aktive und passive Exoskelette in den unterschiedlichsten Logistikprozessen. Dazu gehören Kommissionierung und Verpackung in der Kontraktlogistik, Container-Entladung in der Seefracht, Stückgut-handling im Terminal sowie Umpackertätigkeiten im Bereich Luftfracht. Prämisse ist dabei, dass technische oder organisatorische Maßnahmen zur ergonomischen Gestaltung dieser Arbeitsplätze bereits ausgeschöpft sind. Derzeit kommen etwa 400 Exoskelette verschiedener Typen operativ zum Einsatz: von der einfachen Stützhilfe bis hin zu Modellen mit großer Entlastungswirkung. Dafür gilt es, die persönlichen Meinungen der Mitarbeitenden aus Fragebögen mit objektiven Daten bezüglich der ergonomischen Wirkung von Exoskeletten abzugleichen. Dazu wurde gemeinschaftlich ein repräsentatives LogistikszENARIO für Untersuchungen im Forschungsprojekt DigitalExonomics entwickelt.

### 3.1 Modellierung und Vermessung eines Logistikszenarios

Angelehnt an die Logistik-Anwendungsfälle aus der Praxis wurde das Szenario mit emaWD modelliert und geplant. Über das Tool konnten der zeitliche Ablauf sowie der räumliche Aufbau in enger Abstimmung mit DB Schenker geplant und im Voraus optimal abgestimmt werden. Probanden mit Arbeitserfahrung sollten 90 Sekunden lang sechs Pakete von unterschiedlicher Größe und Gewicht (5, 10, 15 kg) umstapeln. Alle 15 Sekunden erfolgte ein akustisches Signal zur zeitlichen Orientierung. Der Vorgang wurde nach einer Pause von je 60 Sekunden viermal wiederholt. Die Kisten mussten von einer auf dem Boden liegenden Platte auf einen in ergonomischer Höhe eingestellten Tisch platziert



**Bild 1.** Arbeitsmodell in „emaWD“ (links) und Proband während der Logistiktaetigkeit im Bewegungslabor (rechts). Foto: Fraunhofer IPA



**Bild 2.** Muskel-Skelett-Modell des Probanden aus AnyBody für die drei Konditionen: ohne Exoskelett (links) – softes Exoskelett (mittig) – rigides Exoskelett (rechts). Grafik: Fraunhofer IPA

werden. Die Kistenreihenfolge war für jeden Probanden gleich. Die Durchführung des Logistikszenarios erfolgte jeweils ohne Unterstützung und mit Unterstützung von zwei sich charakteristisch unterscheidenden Exoskeletten. Die Bewegungen von Mensch und Objekt während der Durchführung des Logistikszenarios wurden mit einem markerbasierten Motion Capture System [26] erfasst (**Bild 1**).

### 3.2 Biomechanische Modellierung der Exoskelette

Die beiden verwendeten Exoskelette wurden im AnyBody Modeling System modelliert und in die analysierten Bewegungsszenarien integriert (**Bild 2**).

Die Starrkörper des rigiden Exoskeletts (**Bild 2**, rechts [27]) sind über kinematische Verbindungen linear und rotatorisch verknüpft. Die kinetische Verknüpfung des Exoskeletts mit dem Menschen erfolgt über definierte Kräfte und Momente. In senk-

rechter Richtung können größere Reaktionskräfte in der Exoskelett-Mensch-Schnittstelle auftreten, die Reaktionsmomente in der mechanischen Schnittstelle sind wiederum schwächer definiert, um die Weichteilbewegung zwischen dem Menschmodell und dem Exoskelett annähernd abzubilden. Die Unterstützungswirkung erfolgt rein passiv als mechanisches Moment im Unterstützungsgelenk des Exoskeletts.

Das aus einer Messreihe des Herstellers [27] stufenlos interpolierte, winkelabhängig wirkende Drehmoment wird um die Transversalachse eingebracht. Das softe Exoskelett ist ebenfalls aus einzelnen Starrkörpern modelliert (**Bild 2**, mittig). Über den Brust- und Beckengürtel ist das Exoskelett mit dem Menschmodell ähnlich dem rigiden Exoskelettmodell mechanisch verknüpft. Das biegbare Rückenmodul ist aus einzelnen Segmenten modelliert, die untereinander über Kugelgelenke verbunden sind. Die unterstützende Wirkung des Exoskeletts wird maßgeblich über die Steifigkeiten der Elastomere und des Rückenmoduls abgebildet.



Proband:in	
Informationen	50. Perzentil, männlich, Altersklasse: 40, Leistungsfaktor: 1
<b>Gesamt Körper [Pkt]</b>	<b>83</b>
Körperstellung [Pkt]	4.8
<b>Haltung [Pkt]</b>	<b>5</b>
19 Umsetzen [Pkt]	77.9
19 Halten [Pkt]	0
19 Tragen [Pkt]	0
19 Ziehen & Schieben [Pkt]	0
<b>manuelle Lastenhandhabung [Pkt]</b>	<b>78</b>
Σ gehandhabte Last ≥ 3kg pro Schicht (ergonomisch günstig) [kg]	5280.00
Σ gehandhabte Last ≥ 3kg pro Schicht (ergonomisch ungünstig) [kg]	15840.00
Σ gehandhabte Last ≥ 3kg pro Schicht gesamt [kg]	21120.00

**Bild 3.** EAWS-Ergebnis des beschriebenen Logistikszenarios: vier Durchgänge à 90 Sekunden Tätigkeit und 60 Sekunden Pause, Taktzeit: 600 Sekunden, 44 Takte pro Schicht. Grafik: Fraunhofer IPA

Die über das Gesäß verlaufenden Elastomere sind anhand eines parametrisierten, längenabhängigen Kraftverlaufs modelliert. Die Elastomer- und Rückensteifigkeiten des Exoskeletts wurden in enger Abstimmung mit dem Hersteller bestimmt [28].

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ergonomischen Auswertung des beschriebenen Logistikszenarios und die biomechanischen Ergebnisse der Exoskelett-Modellierungen auf kritische Bewegungssequenzen exemplarisch aufgezeigt.

### 4.1 Ergonomische Auswertung

Das beschriebene Szenario der Labormessungen wurde für einen Probanden hinsichtlich der Ergonomie während der Tätigkeit mit emaWD ausgewertet. Das ema-Menschmodell wurde auf die Anthropometrie und Altersklasse des analysierten Probanden angepasst. Für die vier Durchgänge, in denen sechs Pakete zunächst von einem Tisch auf den Boden und anschließend zurück auf den Tisch sortiert wurden, erfolgte eine EAWS-Analyse.

Die Taktzeit wurde entsprechend der geplanten Durchführung auf zehn Minuten gesetzt. Diese umfasst die Tätigkeitszeit von 90 Sekunden und die Pausenzeit von 60 Sekunden pro Durchgang. Gemäß dieser Randbedingungen ergibt sich ein EAWS-Punktwert von 83 (**Bild 3**). Dies entspricht einer Beanspruchung im rot eingestuften Bereich und signalisiert, dass eine ergonomische Anpassung des Arbeitsplatzes erforderlich ist. Der Punktwert ergibt sich durch die zu handhabenden Lasten in ungünstiger Körperhaltung.

In **Bild 4** ist der Oberkörperbeugewinkel über den Zeitraum eines Durchgangs dargestellt, inklusive der durch EAWS definierten Grenzbereiche. Der Beugewinkel liegt überwiegend zwischen 20° und 60° und ist damit in einem gelben Beanspruchungsbereich eingestuft. Dies zeigt die haltungsbedingt hohe Belastung auf den Rücken bei der Tätigkeit.

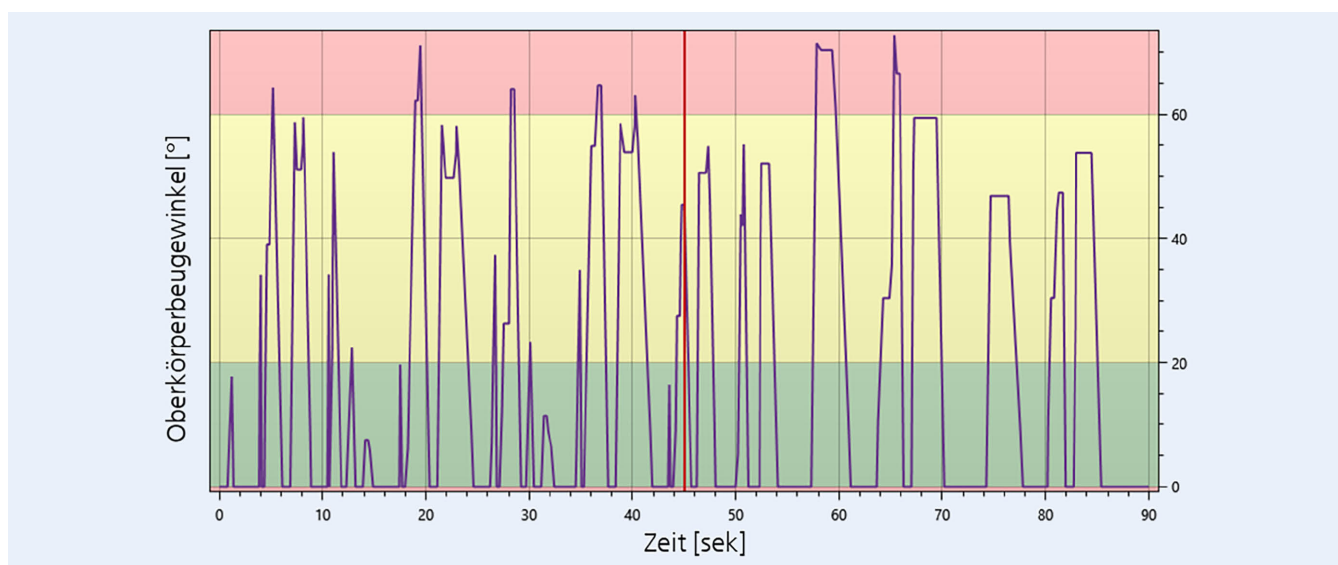
### 4.2 Biomechanische Auswertung

Nachfolgend werden ausgewählte biomechanische Beanspruchungsgrößen und der metabolische Energieumsatz betrachtet (**Bild 5** [29] und **Bild 6**).

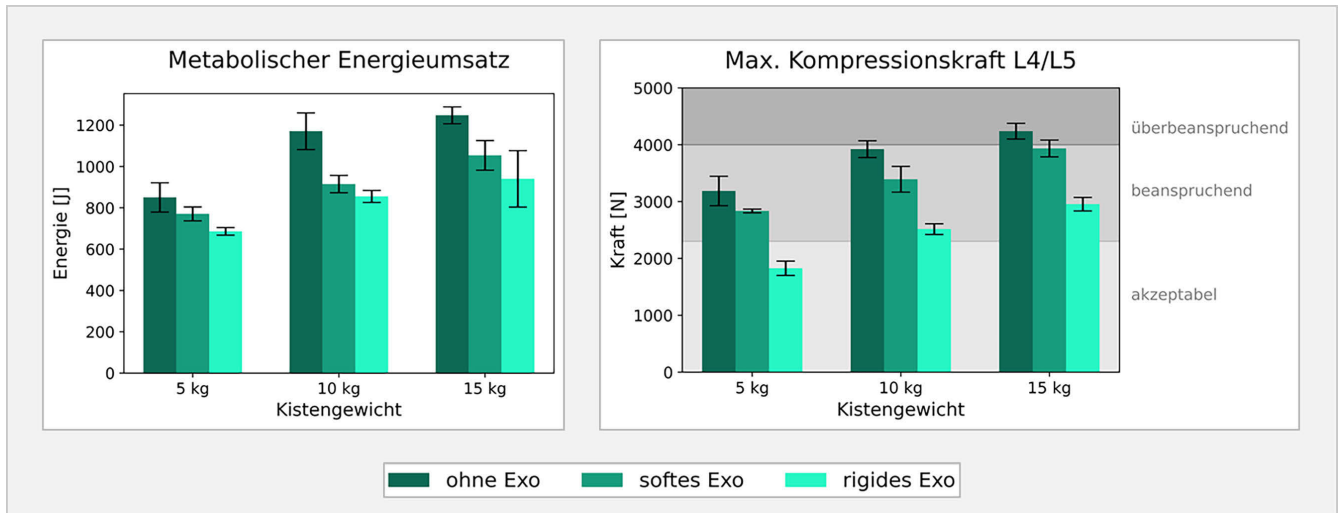
Als intendierte biomechanische Beanspruchungsgröße wird die Kompressionskraft L4/L5, die die kranial nach kaudal wirkende Kraft zwischen den Wirbeln L4 und L5 beschreibt, betrachtet. Als nicht intendierte Größen werden die maximal resultierende Kniegelenkskraft, der Betrag aus der Kompressions- und Scherkraft im Kniegelenk sowie die maximale patellofemorale Kompressionskraft analysiert (**Bild 6**). Die patellofemorale Kompressionskraft ist die Kraft, die auf die Kniescheibe und den Oberschenkelknochen beim Beugen und Strecken des Kniegelenks wirkt. Eine optimale Kraftübertragung kann über eine intakte Knorpelstruktur garantiert werden und dient als Indikator für eine ungünstige Kniebeanspruchung [30].

## 5 Diskussion und zukünftige Arbeiten

Bezüglich der intendierten biomechanischen Effekte im metabolischen Energieumsatz und der Lumbalkompression entlasten



**Bild 4.** Oberkörperbeugewinkel während der Tätigkeit des Logistikszenarios für einen Durchgang inklusive Grenzwerte für die Oberkörperbeugung nach dem EAWS-Bewertungsschema über die gesamte Zeit des Logistikszenarios. Grafik: Fraunhofer IPA.



**Bild 5.** Metabolischer Energieumsatz und maximale Kompressionskraft im Vergleich der verschiedenen Unterstützungs- und Lastbedingungen. Die Lumbalkompression ist in drei Bereiche nach den revidierten Dortmunder Richtwerten geschlechts- und altersspezifisch eingeordnet [30]. Grafik: Fraunhofer IPA



**Bild 6.** Maximal resultierende Kniegelenkskraft (eingeordnet in Vergleichsbelastungsfälle) und Kompressionskraft Patella-Femur im Vergleich unter verschiedenen Unterstützungs- und Lastbedingungen. Grafik: Fraunhofer IPA

beide Exoskelett-Systeme. Die prozentuale Reduktion ist aufgrund der Lastbedingungen nochmals deutlich höher als in einer Vergleichsstudie mit ähnlichen Modellrandbedingungen [12]. Das rigide Exoskelett reduziert die Lumbalkompression im gezeigten Lastfall durchschnittlich über die Gewichte um 35,6%, das weiche System hingegen reduziert um durchschnittlich 10,3%. Dies zeigt und unterstreicht in besonderem Maße, dass Exoskelett-Systeme für eine konsequente ergonomische Arbeitsgestaltung an die realen Anwendungsbedingungen angepasst und verstanden werden sollten. Die nicht intendierten biomechanischen Effekte zeigen bei dem hier analysierten Probanden keine besonderen Auffälligkeiten. Sie sollen an dieser Stelle beispielhaft für einen Probanden und das Knie aufgezeigt werden, um im weiteren Verlauf mit einer größeren Datenmenge als transparente Diskussionsgrundlage für Arbeitsmedizin und Orthopädie zur Absicherung von nicht erwünschten kritischen Lastumverteilungen zu dienen.

Die Ergebnisse dienen als Basis für die Entwicklung einer Bewertungsmethode von Exoskeletten in digitalen Arbeitsplatz-

und Prozesssoftwarewerkzeugen. Diese soll basierend auf bereits bestehenden Bewertungsansätzen entwickelt werden (wie ESO-EAWS [31], Exo-LiFFT [32], Equivalent Weight [33]). Des Weiteren sind Validierungsuntersuchungen für die Exoskelett-Mensch-Modelle geplant. Dabei sollen neue Ansätze [34] zur Modellierung von Steifigkeiten an der mechanischen Schnittstelle zum Einsatz kommen.

## 6 Fazit

Die Ergebnisse der kombinierten Anwendung von Arbeitsplatz- und Prozessmodellen und muskuloskeletalen Mensch-Modellen zeigen großes Potenzial für eine transparente und objektive Arbeitsgestaltung mit Berücksichtigung von Exoskeletten als personenbezogene ergonomische Maßnahme im TOP-Prinzip.

Die persönlichen Eindrücke in Kombination mit objektiven ergonomischen Ergebnissen sind für DB Schenker besonders wichtig beim Einsatz von Exoskeletten und bilden die nötige

Grundlage für ein aktives Gesundheitsmanagement in allen Produktbereichen: von der Prävention über die betriebliche Wiedereingliederung bis hin zur Inklusion von Mitarbeitenden.

## FÖRDERHINWEIS

Die in dem Beitrag beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsverbundprojektes „DigitalEconomics: Digitale Arbeitsgestaltung und Ergonomiebewertung für die Anwendung industrieller Exoskelette“ als Teil von KMU-innovativ (Förderkennzeichen 01IS21025D) erarbeitet.

## DANKSAGUNG

Besonderer Dank geht an die Probanden von DB Schenker für die Teilnahme. Außerdem bedanken sich die Autoren bei der Firma imk Industrial Intelligence GmbH für die Unterstützung bei der Arbeitsplatz-, Prozess- und Exoskelettm modellierung und deren Auswertung sowie bei den beteiligten Mitarbeitenden des Fraunhofer IPA für die Planung, den Aufbau und die Durchführung der Labormessungen.

## Literatur

- [1] Daub U.; Gawlick S.; Blab F.: Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung: Prinzipien aus Trainings-, Sport- und Arbeitswissenschaft zur Entlastung des Bewegungsapparates. Stuttgart: Fraunhofer IPA 2018
- [2] Knieps, F.; Pfaff, H.: Pflegefall Pflege?: BKK Gesundheitsreport 2022. Berlin: MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft 2022
- [3] Lippe, E.: Prävalenz von Rücken- und Nackenschmerzen in Deutschland: Ergebnisse der Krankheitslast-Studie BURDEN 2020. Berlin: Robert Koch-Institut 2021
- [4] DIN EN ISO 6385:2016–12: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth Verlag 2016
- [5] Bundesministerium der Justiz: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (ArbSchG). Stand: 2023 Internet: [www.gesetze-im-internet.de/arbSchG/BJNR124610996.html](http://www.gesetze-im-internet.de/arbSchG/BJNR124610996.html). Zugriff am 01.02.2024
- [6] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAuA (Hrsg.): Unzureichende Gestaltung der Arbeitsstätte. Stand: 2023. Internet: [www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung/Gefahrungsbeurteilung/Handbuch-Gefahrungsbeurteilung/Expertenwissen/Arbeitsumgebungsbedingungen/Unzureichende-Gestaltung-der-Arbeitsstaette/Unzureichende-Gestaltung-der-Arbeitsstaette\\_dosier.html?pos=3#:~:text=Arbeitsschutzma%C3%9Fnahmen%20und%20Wirksamkeitskontrolle&text=In%20dieser%20Hierarchie%20spiegelt%20sich,organisatorische%20und%20personenbezogene%20Ma%C3%9Fnahmen%20auszuf%C3%BChren](http://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung/Gefahrungsbeurteilung/Handbuch-Gefahrungsbeurteilung/Expertenwissen/Arbeitsumgebungsbedingungen/Unzureichende-Gestaltung-der-Arbeitsstaette/Unzureichende-Gestaltung-der-Arbeitsstaette_dosier.html?pos=3#:~:text=Arbeitsschutzma%C3%9Fnahmen%20und%20Wirksamkeitskontrolle&text=In%20dieser%20Hierarchie%20spiegelt%20sich,organisatorische%20und%20personenbezogene%20Ma%C3%9Fnahmen%20auszuf%C3%BChren). Zugriff am 01.02.2024
- [7] Hensel, R.; Keil, M.: Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72 (2018) 4, S. 252–263
- [8] Crea, S.; Beckerle, P.; De Looze, M. 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
- [9] De Bock, S.; 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
- [10] Kranenborg, S. E.; Greve, C.; Reneman, M. F. et al.: Side-effects and adverse events of a shoulder- and back-support exoskeleton in workers: A systematic review. *Applied ergonomics* 111 (2023) #104042, doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104042
- [11] Europäische Kommission: Industrie 5.0. Stand: 2023. Internet: [research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en](http://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en), Zugriff am 01.02.2024
- [12] Fritzsche, L.; Galibarov, P.; Gärtner, C. et al.: Assessing the efficiency of exoskeletons in physical strain reduction by biomechanical simulation with AnyBody Modeling System. *Wearable Technologies*, 2 (2021) E6, doi.org/10.1017/wtc.2021.5
- [13] Seiferheld, B. E.; Andersen, M. S.; Frost, J. et al.: Biomechanical investigation of a passive upper-extremity exoskeleton for manual material handling – a computational parameter study and modelling approach. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 7 (2022) 3/4, pp- 275–300
- [14] Tröster, M.; Budde, S.; Maufroy, C. et al.: Biomechanical Analysis of Stoop and Free-Style Squat Lifting and Lowering with a Generic Back-Support Exoskeleton Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (2022) 15, #9040. doi.org/10.3390/ijerph19159040
- [15] Ripic, Z.; Theodorakos, I.; Andersen, M.S. et al.: Prediction of gait kinetics using Markerless-driven musculoskeletal modeling. *Journal of Biomechanics* 157 (2023) #111712, doi.org/10.1016/j.jbio-mech.2023.111712
- [16] AnyBodyRun Technology: Homepage. Internet: [anybodyrun.com/](http://anybodyrun.com/). Zugriff am 01.02.2024
- [17] Fraunhofer IPA: DigitalEconomics – Digitale Arbeitsgestaltung und Ergonomiebewertung für die Anwendung industrieller Exoskelette. Internet: [www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DigitalEconomics.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DigitalEconomics.html). Zugriff am 01.02.2024
- [18] imk Industrial Intelligence GmbH: ema Work Designer. Internet: [imk-ema.com/ema-work-designer/](http://imk-ema.com/ema-work-designer/). Zugriff am 01.02.2024
- [19] Leidholdt, W.; Fritzsche, L.; Bauer, S.: Editor menschlicher Arbeit (ema). In: Bullinger-Hoffmann, A.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): *Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Heidelberg Springer Vieweg 2016, S. 355–362
- [20] Schaub, K. G.; Mühlstedt, J.; Illmann, B.; Bauer, S. et al.: Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modeling and the „ergonomics assessment worksheet“ (EAWS). *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 3 (2012) 3/4, pp.398 – 426, doi.org/10.1504/IJHfms.2012.051581
- [21] Rasmussen, J., Damsgaard, M., Surma, E. et al.: AnyBody – a software system for ergonomic optimization. *Fifth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. Lido di Jesolo – Venice, Italy, 2003, pp. 6–6
- [22] Bassani, T.; Stucovitz, E.; Qian, Z. et al.: Validation of the AnyBody full body musculoskeletal model in computing lumbar spine loads at L4L5 level. *Journal of Biomechanics* 58 (2017), pp. 89–96, doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.04.025
- [23] Lund, M. E.; Zee, M.; Andersen, M. S.; Rasmussen, J.: On validation of multibody musculoskeletal models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of engineering in medicine* 226 (2012) 2, pp. 82–94, doi.org/10.1177/0954411911431516
- [24] Damsgaard, M.; Rasmussen, J.; Christensen, S. T. et al.: Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. *Simulation Modelling Practice and Theory* 14 (2006) 8, pp. 1100–1111
- [25] Simonsen, M. B.; Englund, B. K.; Kristiansen, M. et al.: Person-specific scaling of maximal isometric strength based on resistance training exercises influences ankle, knee and hip forces during walking. *Gait & posture* 106 (2023) supplement 1, pp. S27-S28, doi.org/10.1016/j.gaitpost.2023.07.036
- [26] Qualisys: Homepage. Internet: [www.qualisys.com/](http://www.qualisys.com/). Zugriff am 01.02.2024
- [27] SUITX by Ottobock: IX BACK. Stand: 2023. Internet: <https://www.suitx.com/de/produkte/ix-back-exoskelett>. Zugriff am 01.02.2024
- [28] HUNIC GmbH: SoftExo Lift 6. Stand: 2023. Internet: <https://hunic.com/softexo-lift/>. Zugriff am 01.02.2024
- [29] Jäger, M.: Die „Revidierten Dortmunder Richtwerte“ Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 69 (2019) 5, S. 271–289
- [30] Bizzini, M.; Biedert, R.; Maffioletti, N. et al.: Biomechanische Aspekte in der Rehabilitation des Patellofemoralgelenks. *Der Orthopäde* 37 (2008) 9, S. 864–871, doi.org/10.1007/s00132-008-1293-6
- [31] Fondazione Ergo-MTM Italia: Exoskeleton certification. Internet: <https://www.eaws.it/exoskeleton-certification/>. Zugriff am 01.02.2024
- [32] Zelik, K. E.; Nurse, C. A.; Schall, M. C. et al.: An ergonomic assessment tool for evaluating the effect of back exoskeletons on injury risk. *Applied Ergonomics* 99 (2022), #103619, doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103619

- [33] Di Natali, C.; Chini, G.; Toxiri, S. et al.: Equivalent Weight: Connecting Exoskeleton Effectiveness with Ergonomic Risk during Manual Material Handling. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (2021) 5, #2677, doi.org/10.3390/ijerph18052677
- [34] Andersen, M. S.; Zee, M. de; Damsgaard, M. et al.: Introduction to Force-Dependent Kinematics: Theory and Application to Mandible Modeling. *Journal of Biomechanical Engineering* 139 (2017) 9, #091001, doi.org/10.1115/1.4037100



**Mark Tröster, M.Sc.**   
Foto: Fraunhofer IPA




**Mirjam Holl, M.Sc.**   
Foto: Fraunhofer IPA

**Rebecca Rack, M.Sc.**

**Urban Daub, M.Sc.**

**Dr. med. Urs Schneider** 

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl** 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Abteilung Biomechatronische Systeme  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

**Dipl.-Kfm. Gerald Müller**

Schenker Deutschland AG  
Logistics Operational Excellence  
Zentrale Frankfurt am Main  
Lyoner Straße 15, 60528 Frankfurt a. M.  
gerald.mueller@dbschenker.com

LIZENZ



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