

IPA Ergo-Solution basierend auf realen Anwendungsdaten

Arbeitsgesundheit mit digitalen Exoskeletten

M. Tröster, V. Kopp, M. Holl, U. Daub, C. Maufroy, U. Schneider, T. Bauernhansl

Muskel-Skelett-Erkrankungen und der demografische Wandel sind Treiber für die sensibilisierte Betrachtung von körperlich anspruchsvollen Arbeitsplätzen. Industrielle Exoskelette versprechen flexible Entlastung. Eine differenzierte Anwendungsanalyse ist die Basis für eine erfolgreiche Implementierung. Die vorgestellte digitale Methode erweitert die „IPA Ergo-Solution“ bei Exoskelett-Pilotstudien mithilfe biomechanischer Modelle. Wirksamkeiten lassen sich vorab basierend auf echten Anwendungsdaten überprüfen und liefern eine objektive Datengrundlage für ergonomische Potenziale.

STICHWÖRTER

Arbeitsergonomie, Automatisierung, Mensch und Technik

1 Einleitung

Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) haben weltweit großen Einfluss auf den arbeitsbedingten Ausfall vieler Beschäftigter, dies gilt besonders im Logistiksektor [1]. Dies kann durch das Heben und Tragen schwerer Lasten, Arbeiten in Zwangshaltungen, hohe Repetition und das Fehlen von Erholungspausen entstehen [2]. Auch durch den demografischen Wandel und Fachkräftemangel treten arbeitsergonomische Maßnahmen vermehrt in den Fokus. Mit ergonomischen Maßnahmen sollen die Menschen und ihre Gesundheit geschützt werden [2]. Das Deutsche Arbeitsschutzgesetz [3] schreibt vor, Gefahren, die an einem Arbeitsplatz entstehen, zu beseitigen oder zu entschärfen. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) empfiehlt dafür das TOP-Prinzip. Ist eine technische (T) Maßnahme nicht möglich, soll weiter priorisiert eine organisatorische (O) und zuletzt eine personenbezogene Maßnahme (P) in Betracht gezogen werden. Generell sollten industrielle Exoskelette nach Empfehlung des Instituts für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) als personenbezogene Maßnahme verstanden werden [4]. Hierunter fällt etwa die Nutzung persönlicher Schutzausrüstung (PSA), der in besonderen Fällen auch industrielle Exoskelette zugeordnet werden können [5]. Industrielle Exoskelette bieten aufgrund ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten großes Potenzial zur Ergonomie-Optimierung [6] für die Gesunderhaltung, berufliche Wiedereingliederung und als eine mögliche Leistung zur Teilhabe am Arbeitsleben (LTA).

Industrielle Exoskelette wirken aus arbeitswissenschaftlicher Sicht auf die personenbezogene Beanspruchungsreaktion, welche

IPA Ergo-Solution with digital assessment for industrial exoskeletons based on real application data

Prevalence of musculoskeletal disorders and demographic change are increasing the need for flexible ergonomic solutions to improve the working conditions of physically demanding work places. In this regard, industrial exoskeletons show high potential which can only be fully realized after a refined analysis of the target application. This digital enhancement of the „IPA Ergo-Solution“ allows accessing in advance the capacity of exoskeleton solutions to provide effective bio-mechanical support based on real application data, providing an objective data basis to quantify the ergonomic impact.

durch eine gegebene externe und anwendungsbezogene Arbeitsbelastung hervorgerufen wird. Zudem funktionieren Exoskelette mithilfe passiver, semi-aktiver oder aktiver Mechanismen, die sich in ihrer Unterstützungsleistung stark unterscheiden können [6]. Daher bedarf es differenzierter und detaillierter Assessmentmethoden für das objektive Verständnis und die Einordnung der Wirksamkeit.

Gängige Methoden zur Ergonomiebewertung wie das Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS), die Leitmerkmalermethode (LMM), das Rapid Upper Limb Assessment (RULA) oder Rapid Entire Body Assessment (REBA) helfen ergonomisch kritische Arbeitsszenarien zu identifizieren und liefern erste Indizien für besonders beanspruchte Körperregionen. Aktuell werden Ansätze zur Erweiterung dieser international etablierten Methoden zur integrierten Betrachtung von Exoskeletten diskutiert und für erste Schuldersysteme im Rahmen der „MTM Association“ umgesetzt.

Die EAWS-ESO-Zertifizierung [7] beruht auf Laborstudien, in denen die biomechanische Wirksamkeit in isolierten Tätigkeiten von rumpf- und schulterunterstützenden Exoskeletten bereits nachgewiesen werden konnte [8]. Weitere vereinzelte Studien betrachten anhand elektromyographischer Daten und subjektivem Komfortempfinden die Wirksamkeit im industriellen Anwenderumfeld [9, 10]. Dies erfordert aber eine nachfolgend aufwendige Auswertung und Interpretation durch Fachleute und ist wenig praktikabel für hierfür nicht geschulte Ergonomie-Beauftragte. Zu beachten ist auch, dass oft die gewählten technischen Unterstützungseinstellungen des Exoskeletts nicht genau bekannt sind,

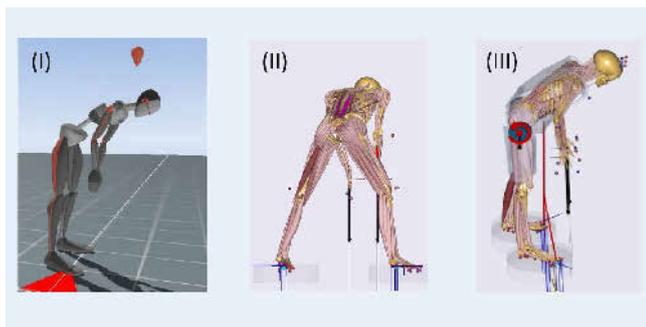


Bild 1. Methodischer Ablauf der Analyse. Stufe I: Kinematische Analyse (links), Stufe II: Kinetische Analyse ohne Exoskelett (mittig) und Stufe III: Kinetische Analyse mit Exoskelett-Unterstützung (rechts).
Grafik: Fraunhofer IPA

sodass konkrete Interpretationen und Vergleiche von Unterstützungsparametern nicht getroffen werden können.

Im Rahmen digitaler Ergonomie [11] werden Menschmodelle vermehrt für die systematische und objektive Planung und Bewertung ergonomischer Maßnahmen eingesetzt. Detaillierte biomechanische Exoskelett-Menschmodellanalysen sind aktuell wenig verbreitet, können aber anhand erfasster Bewegungsdaten teilautomatisiert große Datenmengen und damit ganzheitliche Auswirkungen von Exoskeletten unter verschiedenen Einstellungsparametern untersuchen. Dies mindert den sensorischen Aufwand und schärft die zielgenaue Anpassung der Systeme unter Berücksichtigung unerwünschter Nebenwirkungen, wie etwa Belastungsumverteilungen [12, 13].

In diesem Beitrag wird exemplarisch anhand eines logistischen Arbeitsszenarios die Erweiterung der „IPA Ergo-Solution“ [14] mit der modellgestützten Wirksamkeitsanalyse für rumpfunterstützende Exoskelette angedeutet.

2 Methode

Angelehnt an die Methodik der IPA Ergo-Solution [14], wird das Anwendungsszenario in einer Arbeitsplatzbegehung, einem gemeinsamen Workshop und einer systematischen Befragung der beteiligten medizinischen Fachleute und der Mitarbeitenden erfasst und ergonomisch kritische Tätigkeiten werden identifiziert. Die identifizierten Tätigkeiten werden vor Ort mit einem mobilen Bewegungserfassungssystem (Xsens Technologies B.V.) unter realen Arbeitsbedingungen aufgezeichnet. Sie dienen als Basis für eine objektive und digitale Bewegungsanalyse. Die Bewegungs- und Anwendungsdaten werden auf kritische menschliche Gelenkwinkel ausgewertet und einer umfassenden Analyse unterzogen, sodass darauf basierend in einem interdisziplinären Team des Fraunhofer IPA zielgerichtete ergonomische Maßnahmen entwickelt werden können. Diese verfolgen das TOP-Prinzip und liefern Vorschläge in möglichst allen Bereichen. Es können und sollen, wie in [14] beschrieben, zunächst technische, wie etwa konstruktive Anpassungen am Werkstück oder Arbeitsplatz, und organisatorische Maßnahmen, wie etwa regelmäßige Arbeitsplatzrotationen, sein.

Können keine technischen oder organisatorischen Maßnahmen gefunden werden, kann ein industrielles Exoskelett eine personenbezogene Lösung sein. Die modellgestützte kinetische Analyse basierend auf den erfassten Bewegungs- und Anwendungsdaten gibt hier weiter Aufschluss, ob und welche Art von

Exoskelett-Systemen eine geeignete Unterstützung bieten kann. Dazu werden in der ersten Stufe (I) für jedes Bewegungsszenario isolierte Sequenzen basierend auf ergonomisch kritischen Gelenkwinkelbereichen [15] vorselektiert.

In der zweiten Stufe (II) werden die vorselektierten Bewegungssequenzen anhand eines muskuloskelettalen Menschmodells in „AnyBody“ auf ihre Beanspruchung analysiert. Damit können zunächst auch technische Maßnahmen tiefer analysiert und Beanspruchungen des Muskelskelettsystems unter verschiedenen Arbeitsplatzparametern (beispielsweise verschiedene Tischhöhen oder Lastgewichte) verglichen werden. So können systematisch anhand der Anwendungsanalyse denkbare Randbedingungen modelliert werden. Außerdem dienen die einzelnen modellierten Bewegungssequenzen als Bewertungsreferenz für eine potenzielle personenbezogene Unterstützung.

In der dritten Stufe (III), der sogenannten Exoskelett-Mensch-Analyse, werden Kraft- und Drehmomentparameter im Exoskelettmodell systematisch variiert. So wird eine differenzierte Betrachtung der sich stark unterscheidenden Exoskelettausführungen im komplexen Bewegungslastfall möglich. Über die systematische Variation von kinetischen Parametern im Exoskelettmodell können kinetische Wirksamkeiten beispielsweise von schwach passiven bis hin zu flexiblen, stärker unterstützenden aktiven Systemen, nachgestellt werden. Zudem bietet der modellbasierte Ansatz die Möglichkeit, die maximale physikalische Entlastungswirkung im gegebenen realen Lastfall zu berechnen. Dies liefert den beteiligten Fachkräften für Ergonomie und Arbeitsmedizin eine weitere wichtige Referenz für die Einordnung der angewendeten Unterstützungsleistung (**Bild 1**).

Die Auswahl der biomechanischen Evaluationsgrößen erfolgt bewegungs- und körperbereichsbezogen. Die mechanischen Belastungswerte werden je nach Anwendung auf kumulierte Beanspruchung und/oder Beanspruchungsspitzen untersucht. Die Interpretation und Einordnung der Beanspruchung hängt stark von der Anwendergruppe ab und ist eng mit medizinischen Fachleuten abzustimmen. Allgemein anerkannte Gelenk- und Muskelbeanspruchungskennwerte dienen der Einordnung [16, 17].

3 Anwendung

Im exemplarischen Logistikarbeitszenario verblieben nach Einführung von technischen und organisatorischen Maßnahmen manuell schwere Lastenhandhabungen in Form von symmetrischen und asymmetrischen Hebe, Halte- und Tragetätigkeiten. Basierend auf kritischen Rumpf- sowie Knieflexions- und Rumpfrotationswinkeln wurden daraus neun repräsentative statische und dynamische Tätigkeiten (aufgrund Projektverschwiegenheit werden diese nicht weiter benannt) für die kinetische Exoskelett-Mensch-Analyse vorselektiert (durch rote Grenzlinien gekennzeichnet in der mittleren Grafik in **Bild 2**).

Als biomechanische Evaluationsgrößen wurden die Maximalwerte der Lumbalkompression und -scherung zwischen Lendenwirbel 4/5 als Gelenkbeanspruchung und der Aktivierung der Rückenflexoren und -extensoren als muskuläre Beanspruchung herangezogen. Die zu handhabende Last wurde in den kinetischen Modellen als eine konstante Gewichtskraft symmetrisch aufgeteilt auf beide Arme modelliert. Die verwendeten Kennwerte zur Einordnung der Lumbalkompression (leicht bei < 2300 N, mittel bei > 2300 N, stark bei > 3400 N) basieren auf Kennwerten des National Institute for Safety and Health (NIOSH) in den

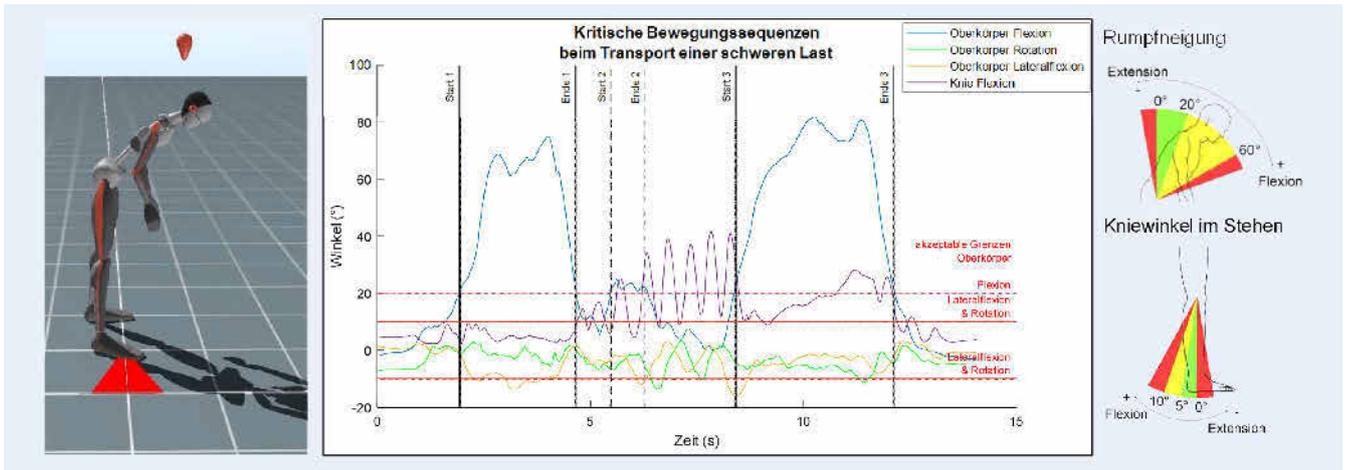


Bild 2. Kinematisches Menschmodell bei Logistiktätigkeit: Heben einer schweren Last symmetrisch zur Körperachse (links, Tätigkeit 05), Gelenkwinkel über zeitlichen Verlauf zur Selektion kritischer Bewegungssequenzen beim Transportieren einer schweren Last (mittig, Tätigkeit 05) mit kritischen Bewegungswinkelkennwerten (in rot) nach DGUV [15] (exemplarisch visualisiert rechts). Grafik: Fraunhofer IPA

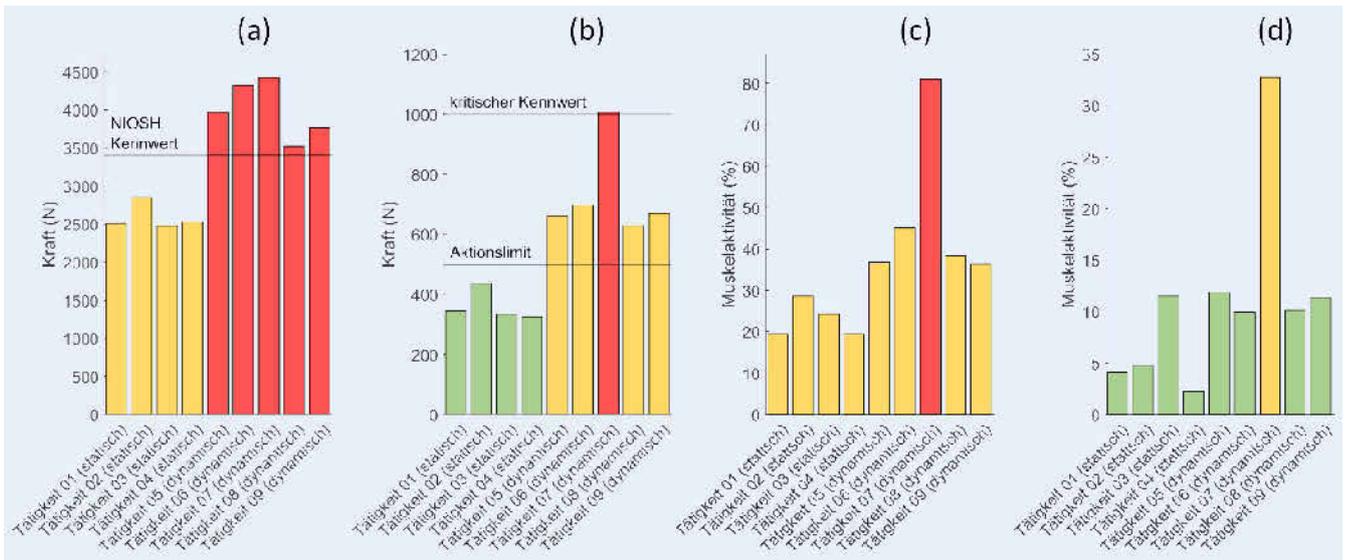


Bild 3. Biomechanische Beanspruchungsspitzen als maximal wirkende Kompressions- (a), Scherkräfte (b) zwischen L4/L5 und maximalen Muskelbeanspruchungen der Rumpfflextoren (c), -flexoren (d) bei den neun Logistiktätigkeitssequenzen. Farbliche Kodierung der Beanspruchung: grün (leicht), gelb (mittel) rot (stark). Grafik: Fraunhofer IPA

USA [16]. Das Aktionslimit und der kritische Kennwert der Scherkräfte im Lumbalbereich und die Muskelbeanspruchungen wurden anhand allgemeiner Kenngrößen der Arbeitswissenschaften [17, 18] definiert.

Alle dynamischen Tätigkeiten zeigen hohe Beanspruchungsspitzen im Vergleich zu den statischen Tätigkeiten und überschreiten sowohl den NIOSH-Kennwert der Lumbalkompression (3400 N), als auch das Aktionslimit der Lumbalscherung (500 N). Besonders für Tätigkeit 07 überschreitet die Lumbalscherung ebenfalls den kritischen Kennwert (1000 N). Dies ist auf die stark asymmetrische Bewegungsausführung zurückzuführen. Die Muskelbeanspruchungen bestätigen die Tendenz der Gelenkkräfte (**Bild 3**).

Die Exoskelett-Unterstützung wurde in diesem Fall idealisiert und angelehnt an aktuell marktverfügbare Systeme (**Bild 4**), die ein unterstützendes Drehmoment am Hüftgelenk einbringen, generisch modelliert.

Die passiven Exoskelettvarianten wurden mit einer linearen Drehmoment-Hüftflexionswinkelabhängigkeit in drei Stufen mit einem maximalen Drehmoment bei einer Hüftflexion von 140° modelliert (**Bild 5**).

Die aktiven und optimalen Exoskelettvarianten wurden als in ihrer Stärke begrenzte und unbegrenzte Optimierungsgrößen bei der Berechnung des inversdynamischen Gleichgewichts in AnyBody [19] modelliert. Damit berechnet das Modell automatisch die in der Stärke begrenzte Momentenunterstützung für die aktive Variante und die in der Stärke unbegrenzte für die optimale Variante. Dies kann in gewissem Maße dem Steuerungsansatz entsprechen, durch KI-Ansätze die Motorunterstützung auf Basis vieler Testläufe auf den personen- und anwendungsbezogenen bestmöglichen Drehmomentverlauf zu trimmen.

Die Exoskelettanalyse für Tätigkeit 07 zeigt das größte Entlastungspotenzial für die aktive Exoskelett-Lösung. Dies ist in allen vier Beanspruchungsgrößen zu erkennen. Sowohl die Flexoren als



Bild 4. Zwei passive (links und mittig) und ein aktives (rechts) Exoskelett zur Entlastung des unteren Rückens.
Foto: (links) OttoBock, Paexo Back, (Mitte) Laevo Exoskeletons, Laevo, (rechts) German Bionic, CrayX

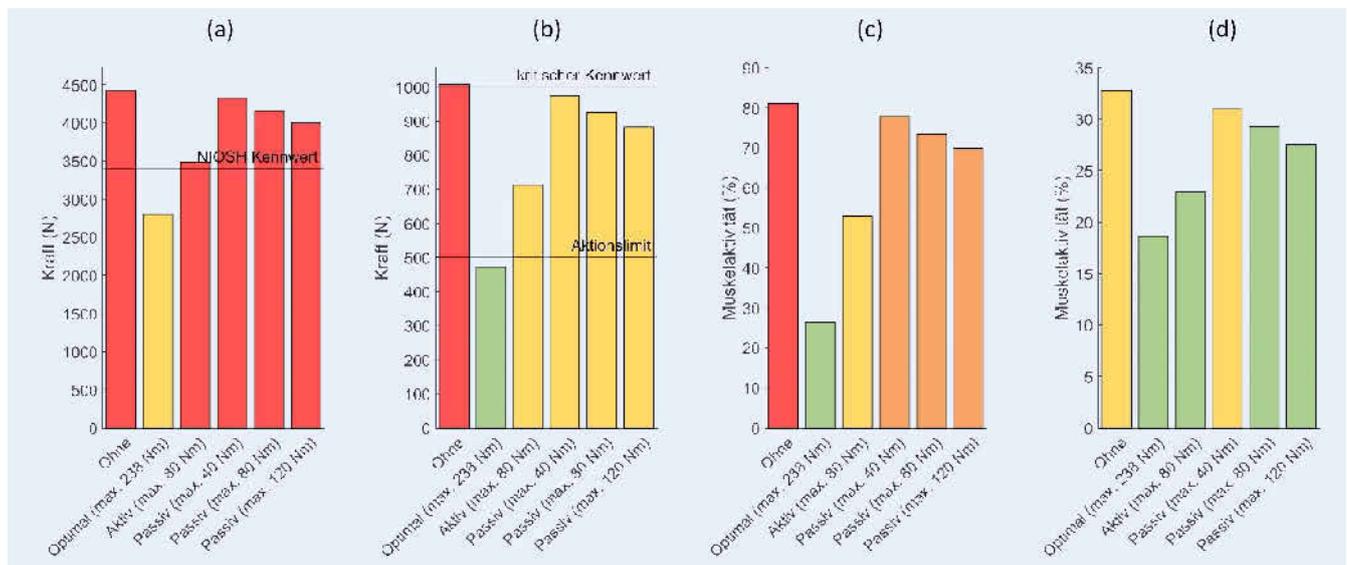


Bild 5. Biomechanische Beanspruchungsspitzen als maximal wirkende Kompressions- (a), Scherkräfte (b) zwischen L4/L5 und maximalen Muskelaktivitäten der Rumpflexoren (c), -flexoren (d) bei Tätigkeit 07 (dynamisches Heben einer Last) mit den unterschiedlichen Exoskelett-Unterstützungsvarianten. Farbliche Kodierung der Beanspruchung: grün (leicht), gelb (mittel) rot (stark). Grafik: Fraunhofer IPA

auch die Extensoren als muskuläre Gegenspieler werden im Rumpfbereich entlastet. Die optimale Entlastung zeigt, dass durch ein hüftunterstützendes Exoskelett eine deutliche Lumbalbeanspruchungsreduktion zu erreichen wäre. Damit könnte eine Unterschreitung im gegebenen Lastfall der Kompressionsaxial- und -scherkraft unter den NIOSH-Kennwert und das Aktionslimit auf Basis der im Modell berechneten Größen möglich sein.

Die Empfehlung für die Mitarbeitenden im analysierten Lastfall könnte ein aktives hüftunterstützendes Exoskelett sein, welches die doch hohe Beanspruchung um ein hinreichendes Maß reduzieren kann. Dies gilt es, in realen Probandenstudien zu untersuchen und zu evaluieren.

4 Diskussion

In der Analyse wurde die Reduktion der Beanspruchungsspitzen exemplarisch durch verschiedene Exoskelettvarianten für den größten Lastfall aufgezeigt. Die Bewegungstechnik ergibt sich meist durch gegebene Randbedingungen in der echten Anwendung, sodass hier angenommen werden kann, dass das Exoskelett wenig Einfluss darauf nimmt. Auch zeigte eine modellbasierte Optimierungsstudie, dass die Hebeteknik und die Exoskelettunterstützung zwar die kumulierte Beanspruchung und Beanspruchungsspitzen beeinflusst, jedoch hat die Exoskelettunterstüt-

zung signifikant mehr Einfluss auf die ergonomisch kritischen Beanspruchungsspitzen [20]. Daher ist es wichtig, die komplexen Bewegungsabläufe erfahrener Mitarbeitenden in der echten Umgebung zu vermessen und damit eine potenzielle Exoskelettunterstützung zu prüfen. Die Auswahl und Einschätzung der isolierten Bewegungssequenzen und der Exoskelettunterstützungsleistung sollte immer bezogen auf die betroffenen Menschen, deren personenbezogene Biomechanik und im ganzheitlichen Arbeitsumfeld verstanden werden. Des Weiteren spielen Wiederholungszahl und Dauer der Tätigkeiten eine wichtige Rolle bei der Einordnung der Exoskelettwirkung. Dazu liefert die modellbasierte Betrachtung eine erste extrapolierbare Datengrundlage und macht sichtbar, wo und welches Exoskelett hinreichend helfen könnte.

Eingeordnet in ganzheitlich digitale Produktions- und Fabrikplanungsmodelle kann diese Art detaillierter biomechanischer Analysen zielführend unterstützen, Transparenz schaffen und die Akzeptanz erhöhen. Vor allem für Arbeitsmediziner könnte die personenbezogene Wirksamkeit des Assistenzsystems für die Einordnung der gewünschten Gesunderhaltung oder Wiedereingliederung der Betroffenen von großer Bedeutung sein.

Hinreichend verifizierte Exoskelett-Mensch-Modelle können einen wichtigen Beitrag zum Nachweis der Präventionswirkung von industriellen Exoskeletten liefern, der aktuell noch nicht hinreichend erbracht ist [21]. Dazu ist es nötig, Exoskelette basie-

rend auf detaillierten CAD-Konstruktionsdaten zu implementieren. Des Weiteren sind kinetische Unterstützungsparameter im Exoskelett unter Berücksichtigung physikalischer Wirkprinzipien, wie zum Beispiel Hysterese-Effekten bei passiven federgestützten Systemen [22], präzise zu modellieren.

Biomechanische Evaluationskennwerte für rumpfunterstützende Systeme für eine personengruppenbezogene Einschätzung könnten die revidierten Dortmunder Richtwerte bieten. Darin werden geschlechts- und altersspezifische Lumbalkompressionskennwerte aus arbeitswissenschaftlicher Sicht erarbeitet und diskutiert [23].

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der modellbasierten Analyse zeigen die Vorteile der objektiven und anwendungsnahen Wirksamkeitsbetrachtung von personenbezogenen Exoskelettunterstützungsvarianten. Integriert in die ganzheitliche und interdisziplinäre IPA Ergo-Solution unter Berücksichtigung des TOP-Prinzips bietet die modellgestützte Analyse Potenzial für eine effiziente Evaluation von industriellen Exoskeletten als personenbezogene Maßnahme. Des Weiteren kann der modellgestützte Ansatz als Evaluationswerkzeug für technische Maßnahmen verwendet werden.

Literatur

- [1] Subin, S.: Jeff Bezos is obsessed with a common Amazon warehouse injury. Stand: 2021. Internet: www.cnbc.com/cdn.ampproject.org/c/s/www.cnbc.com/amp/2021/04/25/jeff-bezos-is-obsessed-with-a-common-amazon-warehouse-injury-.html. Zugriff am 24.01.2022
- [2] Daub, U.; Ackermann, A.; Kopp, V.: Ergonomie-Benefits. Studie. Stuttgart: Fraunhofer IPA, 2019. DOI:10.24406/ipa-n-559153
- [3] Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3334) geändert worden ist. Stand: 22.11.2021. Internet: www.gesetze-im-internet.de/arschg/BJNR124610996.html. Zugriff am 24.01.2022
- [4] DGUV: Fragen und Antworten zum Thema Exoskelette „Möglicher Einsatz von Exoskeletten in der Industrie“. Stand: 2021. Internet: www.dguv.de/fbhl/sachgebiete/physische-belastungen/faq_exo/index.jsp. Zugriff am 24.01.2022
- [5] Marinov, B.: Toyota's Woodstock Plant Makes the Levitate AIRFRAME Exoskeleton Mandatory Personal Protective Equipment. Stand: 2019. Internet: exoskeletonreport.com/2019/02/toyotas-woodstock-plant-makes-the-levitate-airframe-exoskeleton-mandatory-personal-protective-equipment/. Zugriff am 24.01.2022
- [6] Nussbaum, M. A.; Lowe, B. D.; Looze de, M. P. et al.: An Introduction to the Special Issue on Occupational Exoskeletons. IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors 7 (2019) 3–4, pp. 153–162
- [7] Fondazione Ergo-MTM Italia: Exoskeleton certification. Stand: 2020. Internet: www.eaws.it/exoskeleton-certification/. Zugriff am 24.01.2022
- [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), pp. E11
- [9] Hensel, R.; Keil, M.: Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72 (2018) 4, S. 252–263
- [10] Gillette, J.C.; Stephenson, M.: Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. 41st Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, Boulder/USA, 2017, pp. 1–2
- [11] Leidholdt, W.; Fritzsche, L.; Bauer, S.: Editor menschlicher Arbeit (ema) – Vom digitalen Menschmodell zum virtuellen Facharbeiter. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2016, S. 355–362
- [12] Seiferheld, B. E.: Biomechanical investigation of a passive upper extremity exoskeleton for manual handling. Stand: 2021. Internet: www.youtube.com/watch?v=HSsvjouKIQQ. Zugriff am 24.01.2022
- [13] Fritzsche L.; Spitzhirm M.; Gärtner C.: Analyse von Exoskeletten mit biomechanischer Simulation. ASU Zeitschrift für medizinische Prävention 55 (2020) 8, S. 470–474
- [14] Daub U.; Bölke, N.; Kopp V. et al.: Effektiv Belastung reduzieren. wt Werkstattstechnik online 111 (2021) 9, S. 617–621. Düsseldorf: VDI Fachmedien. Internet: www.werkstattstechnik.de
- [15] IFA: Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV-Information 208–033 (bisher: BGI/GUV-I 7011) (Anhang 3). Stand: 2015. Internet: https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/ergonomie/pdf/bewertung_physischer_belastungen.pdf. Zugriff am 24.01.2022
- [16] Afshari, D.; Latifi, S. M.; Kord, S. et al.: Assessment of low back disorders risk based on allowable weight limits for manual lifting in Iran. Industrial health 56 (2018) 4, pp. 327–335.
- [17] McGill, S. M., Norman, R., Yingling, V. et al.: Shear Happens! Suggested guidelines for ergonomists to reduce the risk of low back injury from shear loading. Proceedings of the 30th Annual Conference of the Human Factors Association of Canada, 1998, pp. 157–161
- [18] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 4. Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag 2018
- [19] 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
- [20] Marinou, G.; Millard, M.; Šarabon, N. et al.: Comparing the risk of low-back injury using model-based optimization: Improved technique versus exoskeleton assistance. Wearable Technologies 2 (2021), pp. E13
- [21] Steinhilber, B.; Luger, T.; Schwenkreis, P. et al.: Einsatz von Exoskeletten im beruflichen Kontext zur Primär-, Sekundär-, und Tertiärprävention von arbeitsassoziierten muskuloskelettalen Beschwerden. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 74 (2020) 3, S. 227–246
- [22] Glitsch, U.; Bäuerle, I.; Hertrich, L. et al.: Biomechanische Beurteilung der Wirksamkeit von rumpfunterstützenden Exoskeletten für den industriellen Einsatz. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 74 (2020) 4, S. 294–305
- [23] Jäger, M.: Die „Revidierten Dortmunder Richtwerte“ Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 69 (2019) 5, S. 271–289



Mark Tröster, M. Sc.
Foto: Autor

Verena Kopp, M. Sc.

Mirjam Holl

Urban Daub, M. Sc.

Christophe Maufroy, Ph.D.

Dr. med. **Urs Schneider**

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

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Abteilung Biomechatronische Systeme

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Tel. +49 711 / 970-1789

mark.troester@ipa.fraunhofer.de

www.ipa.fraunhofer.de