Leitmerkmale und Vorgehen einer Implementierung von Exoskeletten

Zentrale Aspekte bei Nutzung von Exoskeletten in industrieller Anwendung

Niclas Hoffmann,
Lennart Ralfs* und
Robert Weidner

Physische Unterstützungssysteme wie Exoskelette gewinnen zunehmend an Bedeutung für Industriearbeitsplätze. Dieser Beitrag stellt diesbezüglich eine Vorgehensweise für AnwenderInnen vor, der eine Verwendung von Leitmerkmalen für Unterstützungssituationen zur Ermittlung der Eignung von Exoskeletten nutzt. Beschrieben wird eine nutzerzentrierte Herangehensweise für den Implementierungsprozess von Exoskeletten, welche eine kritische Reflexion über die Eignung eines Exoskeletts auf Basis von Leitmerkmalen fördern soll.

Einführung in industrielle Exoskelette

Der demografische und gesellschaftliche Wandel, der steigende globale Wettbewerb sowie höhere Flexibilitätsanforderungen stellen Industrieunternehmen heutzutage vor vielschichtige Herausforderungen. Ein vielversprechender Lösungsansatz für Produktions- und Logistikarbeitsplätze mit hoher körperlicher Belastung sind Exoskelette [1, 2], unter denen im industriellen Kontext körpergetragene mechanische, maschinelle oder robotische Stützstrukturen verstanden werden, die Bewegungen verstärken, erleichtern, stabilisieren oder ergänzen [3].

Potenziale am industriellen Arbeitsplatz
Der Einsatz von Exoskeletten kann MitarbeiterInnen bei der Ausführung körperlich anstrengender Tätigkeiten unterstützen [1]. Insbesondere sind die Systeme als Präventionsmaßnahme anwendbar, sofern andere technische und organisatorische Initiativen unzureichend bzw. nicht realisierbar sind [4, 5]. Labor- und Feldstudien konnten auch beispielsweise eine Reduktion der körperlichen [6, 7] und kognitiven Arbeitsbelastung [8, 9] sowie eine Verbesserung der Arbeitsqualität und -produktivität [10, 11] nachweisen. Allerdings sind diese Nachweise rein studienspezifisch und somit nicht zu pauschalisieren [12]. Auch betreffen sie häufig nur isolierte Arbeitsschritte und Körperbewegungen. Durch die große Varianz an industriellen Anwendungsszenarien bleibt der tatsächliche Nutzen von Exoskeletten also in der Praxis bislang kaum belegt [13]. Zudem sollten zukünftig beispielsweise Langzeitwirkungen noch näher untersucht werden.

Werkzeugen in verschiedenen Körperhaltungen [3, 15]. Exoskelette unterstützen dabei besonders belastete Körperregionen, indem entweder kontrollierte Zug- bzw. Druckkräfte über physische Schnittstellen auf den Körper einwirken und dadurch Lasten am Körper umverteilen oder externe Kräfte von der Stützstruktur aufgenommen und entlang des menschlichen Körpers in den Boden geleitet werden [5].

Herausforderungen einer Implementierung

Durch fehlende Erfahrungen mit Exoskeletten bei EndanwenderInnen sowie aufgrund einer Vielzahl kommerziell erhältlicher Systeme mit unterschiedlichen Versprechen und vielen zu berücksichtigenden Aspekten gestaltet sich die industrielle Implementierung von Exoskeletten derzeit (noch) als schwierig [14, 16]. Aufgrund des hohen Neuheitsgrads mangelt es zudem an gesetzlichen Rahmenbestimmungen. Andererseits gibt es bereits verschiedene Unterstützungsansätze für Unternehmen im Implementierungsprozess. Für die nach §6 des Arbeitsschutzgesetzes vorgeschriebene Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz kann beispielsweise eine Checkliste [17] angewendet werden. Auch wurden auf internationaler Ebene freiwillige Standards zur Terminologie, Herstellerinformationen und betrieblichen Anwendung

Gestaltungs- und Anwendungsformen
Industrielle Exoskelette sind allgemein sehr heterogen gestaltet und können unterschiedlich klassifiziert werden [14, 15]. In der Regel zeigt sich ein Zuschnitt bzw. eine technische Optimierung des Systems auf bestimmte Anwendungsszenarien wie das Greifen, Heben, Tragen oder Handhaben von Gegenständen und

* **Korrespondenzautor**
Lennart Ralfs, M.Sc.
Universität Innsbruck
Institut für Mechatronik/Fertigungstechnik
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck
Tel.: +43 512 507-62806
E-Mail: Lennart.Ralfs@uibk.ac.at

Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

definiert [18]. Des Weiteren werden verschiedene Vorgehensweisen zur Implementierung empfohlen (z.B. [16, 19]) oder Schulungs- oder Beratungsdienstleistungen (z.B. [20]) sowie Berechnungsmodelle zu wirtschaftlichen Einsatzeffekten (z.B. [21, 22]) durch Hersteller angeboten. Zusammenfassend fokussieren die beschriebenen Hilfsmittel meist konkret den Arbeitsplatz, die Arbeitsorganisation, das Unterstützungssystem oder (wirtschaftliche) Unternehmensziele. Die einzelnen Themenbereiche werden dabei aber isoliert voneinander betrachtet, sodass Wechselbeziehungen und Nutzeraspekte nur eingeschränkt aufgegriffen werden. Die Betrachtung des Prozesses verbleibt zudem oftmals auf abstraktem Niveau, wodurch eine Greif- und Operationalisierbarkeit für Unternehmen schwierig ist.

Vor diesem Hintergrund präsentiert dieser Beitrag einen ganzheitlichen Beschreibungsansatz von Unterstützungssituationen auf Basis von Leitmerkmalen, die eine integrierte Betrachtung relevanter Einflussfaktoren ermöglichen. Hierbei wird insbesondere die Ebene der NutzerInnen berücksichtigt. Zudem werden die Leitmerkmale in einen generischen Implementierungsprozess eingebettet.

Charakterisierung industrieller Unterstützungssituationen

Zur ganzheitlichen, strukturierten Charakterisierung von Unterstützungssituationen bedarf es einer systematischen Betrachtung der Einflussdimensionen NutzerIn, Exoskelett und Arbeitsumgebung, ehe deren Ausprägungen und Wechselwirkungen in übergeordneten Leitmerkmalen aufgegriffen werden. Die Aspekte definieren dabei die Anforderungen an Exoskelette.

Mensch als NutzerIn

Im Fokus der Nutzermerkmale stehen die individuellen Eigenschaften sowie Fertigkeiten und Fähigkeiten des Menschen. Diese umfassen beispielsweise die körperliche Konstitution (z.B. Körpergröße und -statur, Leistungsfähigkeit je Alter und Tagesform, Gesundheitszustand) sowie das daraus abgeleitete Belastungsempfinden, das Qualifikations-

Bild 1. Leitmerkmale zur integrierten Betrachtung von Einflussfaktoren einer industriellen Exoskelettnutzung

profil (z.B. Fachkompetenz, Ergonomieverständnis, Tätigkeitsumfang, Status bzw. Position im Unternehmen), die Vorlieben (z.B. Design, Komfort, Bedienbarkeit, Unterstützungsumfang), die persönlichen Eigenschaften (z.B. technische Affinität, Selbstwert, Bequemlichkeit, Sozialverhalten) sowie die Arbeitsroutine (z.B. natürliche Bewegungen, Abläufe, Arbeitsrhythmus).

Exoskelette als physische Unterstützungssysteme

Exoskelette können unterschiedlich aufgebaut sein und technische Eigenschaften besitzen. Merkmale sind beispielsweise die Unterstützungscharakteristik (z.B. Antriebsart, Wirkprinzip, Bewegungs- und Intentionserkennung), die Unterstützungsregion (Extremitäten, Torso, Ganzkörper), die Unterstützungsform (z.B. Bewegung verstärken, erleichtern, stabilisieren oder ergänzen), der Unterstützungsgrad (z.B. Kraftkurve, Krafteinsetzungspunkt, Dynamik) sowie morphologische Aspekte (z.B. kraftleitende Struktur, Strukturrigidität, physische Schnittstelle).

Arbeitsumgebung aus Arbeitsplatz und Umfeld

Aus der Arbeitsumgebung fließen arbeitsplatz- sowie umfeldbezogene Merkmale ein. Für den Arbeitsplatz können dies bspw. Charakteristika der manuellen Kerntätigkeiten in Form von Tätigkeitsprofilen (z.B. Dynamik, Körperhaltung, Bewegungsradius, Arbeitsfrequenz, Gewichte, Varianz), verwendeten Arbeitsmitteln (z.B. Werkzeug, Flurförderzeug, Maschine) sowie Arbeitsschutzvorgaben (z.B. vorgeschriebene PSA, Normen und Richtlinien) sein. Zudem nehmen Umfeldfaktoren wie die Örtlichkeit (z.B. Staub, Platzverfügbarkeit), der soziale Umgang (z.B. Unternehmenskultur, Betriebsklima) und die klimatischen Gegebenheiten (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit) einen Einfluss auf die Unterstützungssituation.

Gebündelte Betrachtung mittels Leitmerkmalen

Die eingeführten Einflussfaktoren fließen in übergeordnete Leitmerkmale ein, die zumindest zwei der Einflussdimen-

Exoskelette

Exoskelette verfolgen technisch unterschiedliche Ansätze, die sich beispielsweise in der Systemgestaltung (morphologische Struktur zur Kraftumleitung etc.) sowie in spezifischen Eigenschaften (charakteristische Unterstützungskraft etc.) widerspiegeln. Die Systeme besitzen dabei unterschiedliche, relevante Systemmerkmale, die im jeweiligen industriellen Anwendungsfall ganzheitlich betrachtet und strukturiert zusammengeführt werden sollten.

sionen Mensch, Exoskelett, Arbeitsplatz oder Umfeld entstammen. Zentrale Einflussfaktoren zur Charakterisierung von Unterstützungssituationen sind in Bild 1 zusammengefasst. Die abgeleiteten Leitmerkmale sind: Gestaltung (z.B. Energiespeicherung und -versorgung, Systemanbindung, Bioverträglichkeit), Handhabung (z.B. Bedienaufwand, Höhe und Anpassbarkeit der Unterstützungsleistung, An- und Ablegen des Systems, Waschbarkeit, Kompatibilität, Entkoppelung bei Nebentätigkeiten), Nutzen (z.B. Unterstützungs- bzw. Entlastungswirkung, unterstützte Bewegungstrajektorien, Mehrwert) sowie Mensch-Technik-Interaktion (z.B. Bewegungstreue, Bewegungsfreiheit, Größenanpassung). Auf die Leitmerkmale wirken zusätzlich Querschnittsthemen wie der Tragekomfort oder die Sicherheit des Exoskeletts ein.

Leitmerkmale im Implementierungsprozess von Exoskeletten

Die eingeführten Leitmerkmale können die Implementierung von Exoskeletten erleichtern, indem sie ein verbessertes ganzheitliches Verständnis für individuelle Unterstützungssituationen schaffen. So ermöglicht die multidimensionale Herangehensweise eine Zusammenführung der produktorientierten Außenansicht auf Exoskelette (z.B. Produktnutzen und Gestaltungswunsch) mit der funktionsorientierten Innenansicht (z.B. technische Realisierung der Funktionsstruktur durch Wirkmechanismen) [23]. Wie Bild 2 zeigt, sollte den Leitmerkmalen eine zentrale Bedeutung bei der Implementierung von Exoskeletten, die sich im dargestellten Vorgehen in fünf Phasen einteilen lässt, zukommen.

Phase 1 – Analyse des Anwendungsfalls
Zunächst sollten Unternehmen die spätere Arbeitsumgebung und Nutzergruppe des Systems anhand der Einflussfaktoren aus Mensch, Exoskelett und Arbeitsumgebung (vgl. Bild 1) analysieren. Auch die Wirk- und Trageeffekte sowie die bestimmungsgemäße Systemanwendung für Exoskelette, die durch den Hersteller definiert werden, sollten vollumfänglich bekannt sein.

Bild 2. Implementierungsprozess für industrielle Exoskelette

Phase 2 – Systemauswahl

Sofern der industrielle Anwendungsfall hinsichtlich NutzerInnen und Arbeitsumgebung definiert ist und umfassende Informationen zu marktvorgängbaren Exoskeletten vorliegen, können die Systeme zielgerichtet sondiert werden. Die Vorauswahl eines favorisierten Exoskeletts wird so möglich.

Phase 3 – Leitmerkmalgeprägte Bewertung

Die mögliche Eignung des ausgewählten Exoskeletts sollte auf Basis von Leitmerkmalen bewertet werden. Hierdurch sind Unternehmen auf die Vielfalt einwirken der Einflussfaktoren sensibilisiert.

Phase 4 – Anwendungsentscheidung

Je nach Bewertung des Unternehmens und Feedback der NutzerInnen sollte eine Ablehnung, anwendungsspezifische Anpassung oder testweise bzw. dauerhaft freiwillige Anwendung des Exoskeletts erfolgen. Sofern das Exoskelett für den Anwendungsfall abgelehnt und folglich ein anderes System favorisiert wird, sollte die Erfüllung der Leitmerkmale erneut kritisch geprüft werden.

Phase 5 – Iterative Evaluation

Im Falle eines dauerhaften industriellen Einsatzes empfiehlt sich eine wiederholte Evaluation in festen Zeitintervallen, um die Eignung des Exoskeletts stets neu bewerten sowie mögliche Lern- und Adaptionsprozesse seitens der NutzerInnen detektieren zu können. Das Exoskelett kann folgend entweder weiter genutzt, modifiziert oder abgelehnt werden.

Zusammenfassung

Exoskelette können eingesetzt werden, um die MitarbeiterInnen am industriellen Arbeitsplatz bei der Ausführung körperlich anstrengender Tätigkeiten zu unterstützen. Insbesondere durch die guten Marktaussichten sowie den technischen Fortschritt hinsichtlich Funktionalität steigt die Systemverfügbarkeit seit einigen Jahren in Quantität und Qualität stetig. Dennoch sind Exoskelette noch immer für viele Unternehmen eine innovative Technologie. Der geringe Erfahrungsschatz und die Vielzahl an wechselwirkenden Einflussfaktoren führen zu einer hohen Komplexität bei der Systemimplementierung. Die Herausforderung besteht daher speziell in der Berücksichtigung der Varianz und Vielfalt an industriellen Anwendungsfällen und Exoskeletten. Da die Systeme derzeit (noch) sehr unterschiedlich in ihrer Gestalt und Umsetzung sowie eher angepasste Detaillösungen als universell sind, ist eine Sensibilisierung der Unternehmen auf gewichtige Einflüsse und deren Zusammenspiel zentral. Hierzu eignen sich übergeordnete Leitmerkmale, die eine Brücke zwischen den Einflussdimensionen NutzerIn, Exoskelett und Arbeitsumgebung schlagen können. Im vorliegenden Beitrag wurde zudem eine allgemeine, erfahrungsbasierte Herangehensweise für die Implementierung von Exoskeletten vorgestellt.

Literatur

1. Weidner, R.; Hoffmann, N.: Technische Unterstützungssysteme – Menschen gewollt. In: Hartard, S.; Schaffer, A. (Hrsg.): Mensch und Technik - Perspektiven einer zukunfts-fähigen Gesellschaft, Metropolis-Verlag, Marburg 2020
2. Bogue, R.: Exoskeletons – A Review of Industrial Applications. *Industrial Robot: An International Journal* 45 (2018) 5, S. 585–590
DOI: 10.1108/IR-05-2018-0109
3. Weidner, R.; Karafillidis, A.: Distinguishing Support Technologies. A General Scheme and its Application to Exoskeletons. In: Karafillidis, A.; Weidner, R. (Hrsg.): *Developing Support Technologies – Integrating Multiple Perspectives to Create Assistance that People Really Want*. Springer Nature Switzerland 2018
DOI: 10.1007/978-3-030-01836-8
4. Schick, R.: Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Fachzeitschrift für Prävention, Rehabilitation und Entschädigung (2018) 1–2, S. 8–11
5. Peters, M.; Wischniewski, S.: Der Einfluss von Exoskeletten auf die Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund 2019
6. Gillette, J. C.; Stephenson, M. L.: Electromyographic Assessment of a Shoulder Support Exoskeleton During on-Site Job Tasks. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 7 (2019) 3–4, S. 302–310
DOI: 10.1080/24725838.2019.1665596
7. Huysamen, K. et al.: Assessment of an Active Industrial Exoskeleton to Aid Dynamic Lifting and Lowering Manual handling tasks. *Applied Ergonomics* 68 (2018) (December 2017), S. 125–131
DOI: 10.1016/j.apergo.2017.11.004
8. Maurice, P. et al.: Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 28 (2020) 1, S. 152–164
DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2945368
9. Schroeter, F. et al.: Cognitive Effects of Physical Support Systems: A Study of Resulting Effects for Tasks at and above Head Level Using Exoskeletons. In: Schüppstahl, T.; Tracht, K.; Henrich, D. (Hrsg.): *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics*. Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2020
DOI: 10.1007/978-3-662-61755-7_14
10. Kim, S. et al.: Assessing the Influence of a Passive, upper Extremity Exoskeletal Vest for Tasks Requiring Arm Elevation: Part I – “Expected” Effects on Discomfort, Shoulder Muscle Activity, and Work Task Performance. *Applied Ergonomics* (2018) 70, S. 315–322
DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.025
11. Spada, S.; Ghibaudo, L.; Gilotta, S.; Gastaldi, L.; Cavatorta, M. P.: Analysis of Exoskeleton Introduction in Industrial Reality: Main Issues and EAWS Risk Assessment. *Advances in Intelligent Systems and Computing* (2018) July, S. 236–244
DOI: 10.1007/978-3-319-60825-9_26
12. Hoffmann, N.; Argubi-Wollesen, A.; Linnenberg, C.; Weidner, R.: Towards a Framework for Evaluating Exoskeletons. In: Wulfsberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B. A. (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2019
DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_44
13. Glitsch, U.: Analyse der Wirksamkeit von Exoskeletten. Aus der Arbeit des IFA 1/2019
14. Weidner, R.; Linnenberg, C.; Hoffmann, N.; Prokop, G.; Edwards, V.: Exoskelette für den industriellen Kontext: Systematisches Review und Klassifikation. 66 Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, Berlin 2020
15. Fox, S.; Aranko, O.; Heilala, J.; Vahala, P.: Exoskeletons: Comprehensive, Comparative and Critical Manufacturing Performance. *Journal of Manufacturing Technology Management* (2019)
DOI: 10.1108/JMTM-01-2019-0023
16. Hold, P.; Ranz, F.; Holly, F.: Exoskelette in Produktion und Logistik. Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien 2020
17. Liedtke, M.: Gefährdungsbeurteilung für Exoskelette, Version 1.1-Entwurf. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, St. Augustin 2019
18. ASTM International: Committee F48 on Exoskeletons and Exosuits. Online unter <https://www.astm.org/COMMITTEE/F48.htm> [Abruf am 9. April 2021]
19. Noonee Germany GmbH: Der Implementierungsprozess des Chairless Chair. Online unter <https://www.noonee.com/implementierungsprozess/#> [Abruf am 9. April 2021]
20. Ottobock SE & Co. KGaA: Paexo. Verfügbar unter: <https://paexo.com/> [Abruf am 9. April 2021]
21. Japet Medical Devices: Ihre Online-Analyse. Online unter <https://de.japet.eu/calculator/> [Abruf am 9. April 2021]
22. Bioservo Technologies AB: Return on Investment – ROI. Online unter <https://www.bioservo.com/professional/return-on-investment-roi> [Abruf am 9. April 2021]
23. Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2010, S. 3–6
DOI: 10.1007/978-3-540-78877-5

Bibliography

DOI 10.1515/zwf-2021-0099

ZWF 116 (2021) 7–8; page 525–528

© 2021 Walter de Gruyter GmbH,

Berlin/Boston, Germany

ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896

Die Autoren dieses Beitrags

Niclas Hoffmann, M.Sc., geb. 1993, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Hamburg (HWI). Von 2018 bis 2021 war er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Fertigungstechnik des Instituts für Mechatronik der Universität Innsbruck beschäftigt. Anfang 2021 wechselte er an das Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg. In seiner Forschung widmet er sich Exoskeletten und deren Interaktion mit dem Menschen am Arbeitsplatz der Zukunft.

Lennart Ralfs, M.Sc., geb. 1994, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Hamburg (HWI). Im Operations Management verfügt er über internationale Berufserfahrung in der Industrie. Seit 2020 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Fertigungstechnik des Instituts für Mechatronik der Universität Innsbruck beschäftigt. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit dem Arbeitsplatz der Zukunft und der Implementierung von Exoskeletten in betriebliche Arbeitsprozesse.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner, geb. 1986, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Hamburg. Er ist Professor für Fertigungstechnik am Institut für Mechatronik der Universität Innsbruck, Leiter der Arbeitsgruppe „Robotik und Automatisierung“ am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg sowie geschäftsführender Gesellschafter der exoIQ GmbH. Schwerpunktmäßig forscht er an Unterstützungstechnologien sowie Methoden für deren Entwicklung, Evaluation und Optimierung.

Abstract

Key Indicators and Procedure of Implementing Exoskeletons – Central Aspects in the Context of Using Exoskeletons in Industrial Applications. Support systems like exoskeletons are becoming increasingly interesting for physically relieving the workforce in industrial workplaces. Technically, the devices feature various properties and different functionalities for industrial applications. Based on key indicators, this article presents a user-oriented implementation process for exoskeletons, allowing to critically reflect and evaluate the suitability of a system in individual support situations.

Schlüsselwörter

Exoskelett, physisches Unterstützungssystem, Gesundheitsprävention, Gebrauchstauglichkeit, Systemmerkmal, Implementierungsprozess

Keywords

Exoskeleton, Physical Support System, Health Prevention, Usability, System Properties, Implementation Process