

## **Evaluation von Antriebssystemen für Exoskelette hinsichtlich der Nutzerakzeptanz**

Johannes WANNER, Matthias HAAG

*Robotiklabor, Hochschule Aalen,  
Beethovenstraße 1, D-73430 Aalen*

**Kurzfassung:** Hauptbestandteile aktiver Exoskelette sind die antriebstechnischen Komponenten, bestehend aus Aktorik, Steuerung und Sensorik. Diese beeinflussen durch ihre Gestaltung und konstruktive Auslegung maßgeblich die Einsatzmöglichkeiten der Exoskelette. Speziell die Antriebssysteme leisten als leistungswandelnde Komponente einen signifikanten Anteil zur Gebrauchstauglichkeit und beeinflussen die Akzeptanz der Exoskelette durch den Nutzer maßgeblich. Um Optimierungspotenzial von Antriebssystemen zu erkennen, sind Prüfverfahren notwendig, mittels derer die Erfüllung zuvor definierter Anforderungen reproduzierbar ermittelt werden können.

**Schlüsselwörter:** Exoskelette, Antriebssysteme, Gebrauchstauglichkeit, Anforderungen, Kriterien, Evaluation

### **1. Einleitung**

Aktive Exoskelette bestehen aus Antriebssystemen, die mit Tragstrukturen wie Gurte, Schalen und Orthesen verbunden sind. Diese Assistenzsysteme wirken mit mechanischer Kraft von außen auf den menschlichen Körper ein und unterstützen diesen (DGUV 2018). Da die Antriebssysteme als leistungserzeugende Komponente maßgeblich zur Gebrauchstauglichkeit (DIN EN ISO 9241-11:2018) der Exoskelette beitragen, müssen diese zu definierende Anforderungen erfüllen. Um Optimierungspotenzial von Antriebssystemen zu erfassen sind Prüfabläufe und Prüfvorrichtungen nötig (Wanner & Haag 2020), die explizit die Akzeptanz der Antriebssysteme durch die Nutzer erfassen.

### **2. Problemstellung**

Antriebe für Exoskelette sind maschinenbautechnische Elemente, die über eine Orthese ähnlichen Struktur fest mit dem Menschen verbunden sind. Durch diese Verbindung zwischen Arbeitsperson und Maschine sind spezifische Anforderungen, die das subjektive Empfinden der Nutzer positiv beeinflussen, nötig. Ist die Akzeptanz der Antriebssysteme durch die Nutzer gering, wird ein Exoskelett, das den Nutzer unterstützen und gesund erhalten soll, nur wenig eingesetzt (Hensel et al. 2023). Zur Akzeptanz von Exoskeletten existieren Empfehlungen und Studien. Diese beziehen sich jedoch meist auf das gesamte Exoskelett und stellen nicht explizit den Einfluss des Antriebssystems heraus. Dieses trägt aber als leistungserzeugende Komponente maßgeblich zur Gebrauchstauglichkeit und zur Akzeptanz des gesamten Exoskeletts

bei. Sollen Antriebssysteme für Exoskelette entwickelt und auf ihre Eignung für den Einsatz im Exoskelett hin evaluiert werden, sind Anforderungen, die die Akzeptanz der Nutzer hinsichtlich der Antriebssysteme fördern, dazugehörige Grenzwerte und Verfahren zur Erhebung von Ergebnissen notwendig (Wanner & Haag 2021).

### 3. Zielsetzung

Ziel ist es, eine Methodik zu entwickeln, die eine objektive und standardisierte Evaluation von Antriebssystemen für Exoskelette ermöglicht. Speziell stehen Exoskelette, die die Arbeitspersonen durch gezielte Entlastung gesund erhalten sollen, im Fokus. Hierzu sind Anforderungen über den Stand von Technik und Wissenschaft hinaus nötig. Diese müssen die Gebrauchstauglichkeit des Antriebssystems, innerhalb von zu definierenden Grenzwerten und Mindestanforderungen, für einen tauglichen Einsatz beschreiben und die Akzeptanz durch die Nutzer fördern. Dazu werden messbare Kriterien, die eine objektive Bewertung der Anforderungen ermöglichen, definiert. Die Ergebnisse der Kriterien müssen durch taugliche Prüfstände erfassbar sein.

### 4. Vorgehensweise

Zur Verfügung stehende Anforderungen aus Richtlinien und bereits durchgeführten Studien, welche für einen tauglichen Einsatz von Antriebssystemen in Exoskeletten zu erfüllen sind, wurden analysiert. Hierzu wurden explizite Anforderungen, die die Bereiche der Gebrauchstauglichkeit wie Sicherheit und Technische Daten, verstärkt aber die Nutzerakzeptanz betreffend, extrahiert. Um weiter noch nicht bekannte, aber potenziell notwendige Anforderungen über den Stand der Technik und Wissenschaft hinaus zu erarbeiten, wurden Bewegungsversuche mit Probanden in simulierter Arbeitsumgebung durchgeführt. Hierzu wurde ein ortsgebundener Montagearbeitsplatz bereitgestellt und erforderliche Bewegungsabläufe innerhalb des typischen Bewegungsbereichs nach DIN EN 294 absolviert. Im Expertenteam (bestehend aus Biomechatroniker, Medizintechniker und Antriebstechniker) wurden durch Beobachtungen und Analysen von Bewegungsabläufen Ergebnisse erarbeitet, die die bereits vorhandenen Anforderungen ergänzen. Um eine objektive Bewertung der Anforderungen und somit der Gebrauchstauglichkeit von Antriebssystemen zu ermöglichen, wurden die Anforderungen durch objektiv erfassbare Kriterien spezifiziert.

Grenzwerte (Maximal- und Minimalwerte), die sich auf das Ergebnis des zu überprüfenden Kriteriums beziehen und somit einen sicheren und tauglichen Einsatz der Antriebssysteme garantieren, sind erforderlich. Hierzu wurden unterstützende Inhalte aus der Literatur analysiert und gegebenenfalls durch iteratives Vorgehen und empirische Versuche ergänzt. Die Bewertung eines ermittelten Ergebnisses des jeweiligen Kriteriums erfolgte anhand der definierten Grenzwerte. Um diesen Erfüllungsgrad objektiv erfassen zu können, sind zwei Prüfstände nötig. Ein Prüfstand diene zur Erfassung des Erfüllungsgrades mittels technischer Messsysteme. Hier wurden Ergebnisse zu Leistung, Wärmeentwicklung, Vibration und Verformung ermittelt. Ein weiterer Prüfstand, dessen Aufbau dem eines Exoskeletts ähnelt, ermöglichte die Montage der Antriebssysteme an den zu unterstützenden Extremitäten von Probanden. Letzterer wurde so gestaltet, dass sowohl die Antriebssysteme, als auch einfache

Gelenke angebracht werden können. Beim Durchführen typischer Bewegungsabläufe (lokaler Montageprozess im industriellen Umfeld) durch die Probanden ist somit ein Vergleich ihrer Empfindungen mit- und ohne Antriebssysteme möglich. Für eine objektive Evaluation der Empfindungen stehen vorgegebene Skalen hinsichtlich der Aufrechterhaltung der Bewegungsfähigkeit, des Störepfindens durch die Antriebssysteme und ihrer Entkopplungsfähigkeit bei einer Abfangbewegung zur Verfügung.

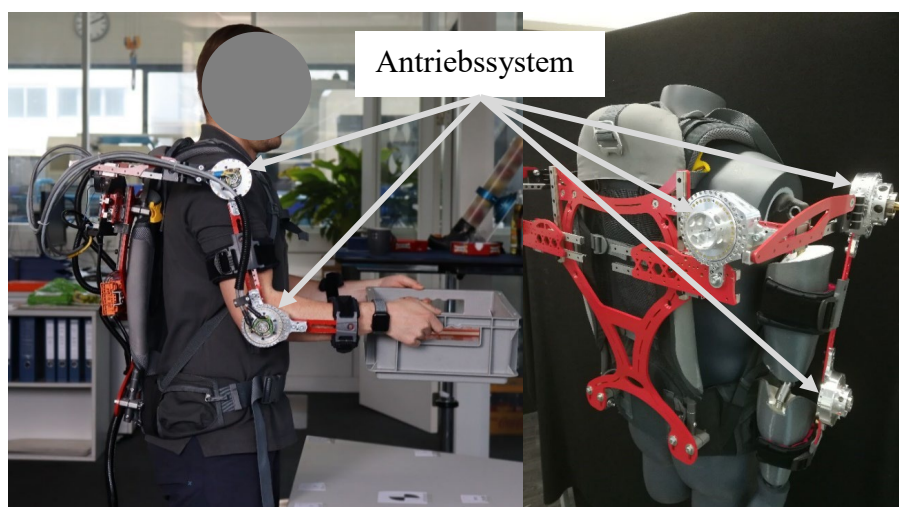
## 5. Ergebnisse

Durch die Analyse von Richtlinien und bereits durchgeführten Studien (Weidner et al. 2022) zur Akzeptanz von Exoskeletten wurden zunächst bekannte Anforderungen extrahiert. Eigens durchgeführte Bewegungsversuche deckten eine Vielzahl bisher nicht explizit benannter, jedoch wesentlicher weiterer Anforderungen auf. Speziell steht hier die „Aufrechterhaltung der Bewegungsfähigkeit bei aktivierten und deaktivierten Antriebssystemen“ im Vordergrund.

Zu jeder Anforderung wurden objektiv erfassbare Kriterien spezifiziert und Grenzwerte erarbeitet. Speziell für Kriterien, die durch subjektive Empfindungen der Probanden bewertet werden, wurde eine Skala (Likert) als Bewertungshilfe erstellt. Diese ermöglicht es, subjektive Empfindungen wie „nicht möglich“ bis „keine Einschränkungen“ einem objektiv bewertbaren Zahlenwert 0 bis 4 zuzuordnen. Zu der Anforderung „Aufrechterhaltung der Bewegungsfähigkeit bei aktivierten und deaktivierten Antriebssystemen“ wurden die folgenden Kriterien erarbeitet:

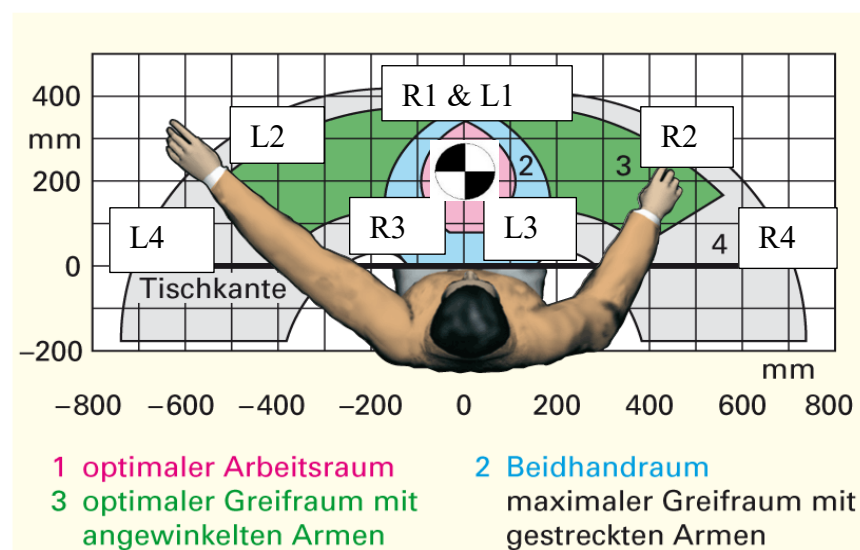
- Störepfinden durch die Geometrie der Antriebseinheit in Bezug auf die Erreichbarkeit der Positionen
- Störepfinden durch den Widerstand beim Beugen und Strecken
- Störepfinden durch die Masse des Antriebssystems bei der Bewegung

Zur Bewertung des Störepfindens durch die Antriebssysteme im Einsatz an der Schulter oder Schulter und Ellenbogen ist eine Prüfvorrichtung, ähnlich eines Exoskeletts für den Oberkörper (Abbildung 1), notwendig. Das eigens entwickelte Exoskelett wurde so konstruiert, dass es mechanische Kräfte durch unterschiedliche Antriebssysteme an Schulter und / oder Ellenbogen aufnimmt und auf den Rumpf überträgt.



**Abbildung 1:** Prüfvorrichtung zur Evaluation der Antriebssysteme durch Probanden

Der Versuch zur Ermittlung des Störempfindens wurde mit 11 Probanden in einem Industriebetrieb durchgeführt. Hierbei wurde das Störempfinden, sowie die empfundene Unterstützung der Antriebssysteme in Kombination am Ellenbogen und Schulter ermittelt. Nur der rechte Arm wurde mittels Exoskeletts mit den Antriebssystemen verbunden. Somit konnten die Empfindungen vom linken Arm ohne Antriebssysteme mit denen des rechten Arms verglichen werden. Empfindungen, die aufgrund des Exoskeletts bzw. der Schalenstruktur etc. entstanden sind, heben sich somit auf und die Empfindungen sind eindeutig durch das Antriebssystem selbst hervorgerufen worden. Zur Ermittlung des Störempfindens sind durch die Probanden Bewegungen auszuführen, die einem Montageprozess ähneln. Hierzu wurde ein Handhabungsgewicht durch die Probanden manuell auf am Prüfstand (Abbildung 2) markierte Positionen bewegt.



**Abbildung 2:** Bewegungsräume (DIN EN 294)

Im Anschluss an die Bewegungsabfolge wurden die Empfindungen der Probanden, hinsichtlich Kraftaufwandes bei der Bewegung und Erreichbarkeit der Positionen durch Befragungen bewertet.

Im Anschluss erfolgte der gleiche Bewegungsablauf mit den Positionen R für die rechte Hand, mit erneuter anschließender Befragung.

Um zusätzlich die empfundene Unterstützung der Antriebssysteme zu erfassen, wurde der linke Arm der Probanden mit Exoskelett, welches mit Sensorik zur Erfassung der jeweiligen Gelenkwinkel versehen war, verbunden. Die Gelenkwinkel wurden auf die Antriebssysteme am rechten Arm übertragen. Somit ist eine synchrone Bewegung beider Arme, links ohne Unterstützung und rechts mit Unterstützung möglich. Durch eine simulierte Hebeaufgabe, eine Kiste beidhändig vom Tisch ins Regal räumen, wurden die Empfindungen zur Entlastung durch die Differenz von linkem Arm und rechtem Arm bewertet.

## 6. Diskussion

Durch die Verwendung der entwickelten Methodik ist eine standardisierte Ermittlung der Nutzerakzeptanz von Antriebssystemen für Exoskelette möglich. Zu den erarbeiteten Anforderungen, Kriterien und Grenzwerten sind Ergänzungen sowie eine Anpassung und Optimierung der Methodik, abhängig von weiteren Erfahrungswerten möglich. Der Versuch wurde darauf ausgelegt, die Einflüsse der Antriebssysteme, die am rechten Arm empfunden werden, mit denen der Orthese, die am linken Arm empfunden werden, zu vergleichen. Positionsänderung der Antriebssysteme am Probanden von wenigen Millimetern zwischen humanoider und durch die Orthese aufgezwungener, momentaner Drehachse bspw. am Ellenbogen führen zur Positionsänderung der Orthesen an den jeweiligen Extremitäten. Empfindungen können dadurch beeinflusst werden.

## 7. Literatur

- DGUV FBHL006: 02/2018: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung; Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen.
- DIN EN ISO 9241-11:2018, 2018: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion –Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO 9241-11:2018); Deutsche Fassung EN ISO 9241-11:2018
- DIN EN 294: Sicherheit von Maschinen; Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrstellen mit den oberen Gliedmaßen.
- Hensel R, Mayr T, Miller N, Keil M (Hrsg.) (2023): Nutzerakzeptanz industrieller Exoskelette als ergonomische Hilfsmittel in der Automobilindustrie – Ergebnisse einer Feldstudie zur subjektiven Evaluation passiver Überkopf-Exoskelette. A.1.10. Nachhaltig Arbeiten und Lernen. Hannover.
- Likert-Skalen: Fünf Aspekte, die bei der Erstellung einer Likert-Frage berücksichtigt werden sollten. Online verfügbar unter <https://www.questionstar.de/content/likertskalen-funf-aspekte-die-bei-der-erstellung-einer-likert-frage-beruecksichtigt-werden>.
- Wanner J, Haag M (Hrsg.) (2020): Entwicklung eines modularen Antriebssystems zur universellen Einbindung in Exoskelette. Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? Berlin (D.1.18).
- Wanner J, Haag M (Hrsg.) (2021): Evaluation von Antriebssystemen für Exoskelette. Frühjahrskongress Arbeit HUMAINE gestalten. Bochum (D.1.6).
- Weidner R, Ralfs L, Hoffmann N, Linnenberg C, Edwards V, Reimeir B et al. (2022): Leitfaden zur Evaluation von Exoskeletten. BGHW-Studie Exo@Work – Bewertung exoskelettaler Systeme in der Arbeitswelt. Universität, Innsbruck. Institut für Mechatronik.

**Danksagung:** Unser Dank gilt dem Team des Robotiklabors der Hochschule Aalen für die Unterstützung innerhalb der Forschungsarbeit. Ein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder von der TU Dresden für seine vielen Anregungen und seine Diskussionsbereitschaft. Des Weiteren bedanken wir uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung, welches das Projekt LEVIAKTOR (Förderkennzeichen: 16SV8005) als Fördermittelgeber begleitete.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

## Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration  
und ihre Auswirkung auf Mensch,  
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement IAT  
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für  
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

---

## GfA-Press

---

**Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024**

**Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart**

**In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

### **Geschäftsstelle der GfA**

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

[info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](mailto:info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de) · [www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](http://www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de)

### **Screen design und Umsetzung**

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de), [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)