

## Konzept eines modularen Exoskeletts zur aktiven Unterstützung der oberen Extremitäten bei physischer Arbeit

Sabine WENZEL, Thomas HELBIG, Stefan LUTHERDT,  
Danja VOGES, Hartmut WITTE

*Fachgebiet Biomechatronik, Technische Universität Ilmenau  
Max-Planck-Ring 12, D-98693 Ilmenau*

**Kurzfassung:** Zur mechanischen Unterstützung des menschlichen Bewegungsapparates schreitet die Entwicklung von Exoskeletten voran. Bestehenden Systemen fehlt jedoch die Marktdurchdringung, da diese meist Individuallösungen darstellen. Mit diesem Beitrag stellen wir ein Konzept für ein Exoskelett der aktiven Unterstützung des Hand-Arm-Schulter-Systems bei physischer Arbeit vor. Es ist ein Unterstützungsgrad von bis zu 30 % geplant, um die muskuläre Ermüdung bei Erhalt des Trainingseffektes zu verzögern. Die Modularisierung soll durch Anwendung eines mechatronischen Baukastensystems ermöglicht werden. Für den Systementwurf gehen wir nach VDI 2206 vor. Ausgehend von dem gesamtheitlichen Systementwurf soll über iterative Entwicklungen der Komponenten und des Gesamtsystems ein Demonstrator realisiert werden.

**Schlüsselwörter:** Exoskelett, Oberextremität, Assistenzsystem, Hand-Arm-Schulter-System

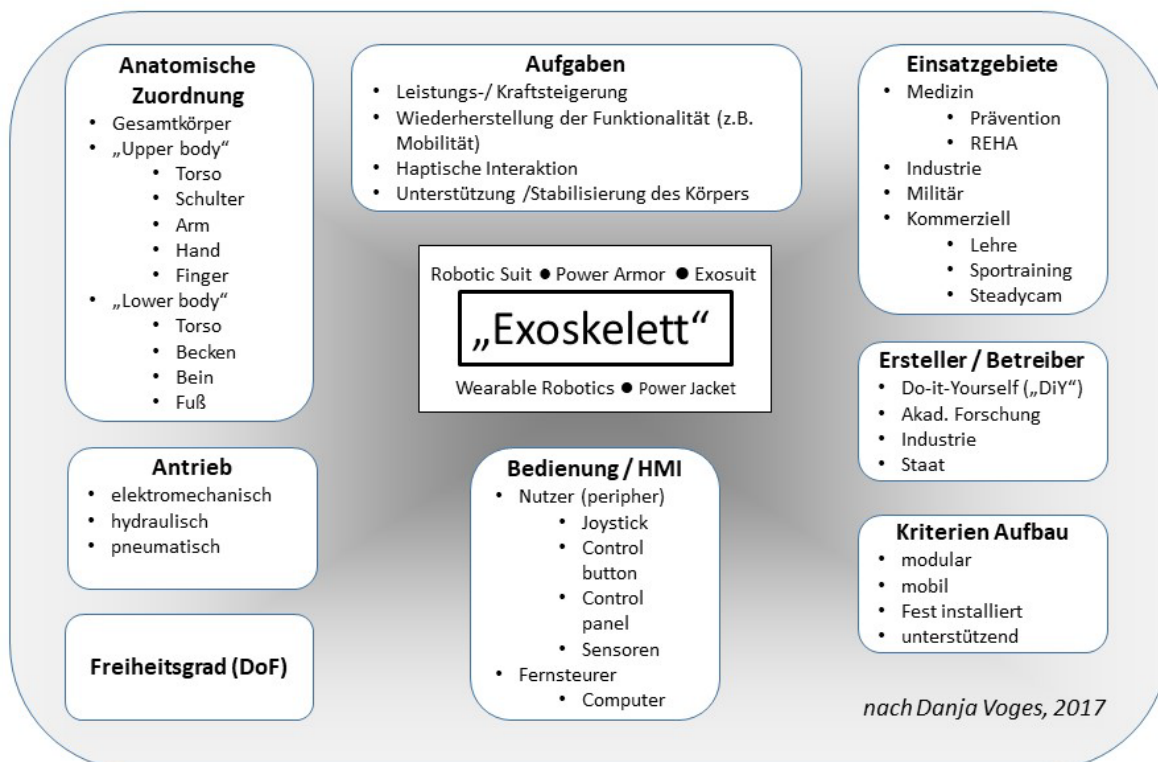
### 1. Motivation und Ausgangslage

Aufgrund der Altersentwicklung in Deutschland und Europa ist es wichtig, Arbeitsplätze und das berufliche Umfeld so zu verändern, dass Arbeitnehmer durch geeignete Arbeitsbedingungen dauerhaft leistungsfähig bleiben. Vor allem physisch arbeitende Arbeitnehmer sind hohen körperlichen Belastungen ausgesetzt. Ohne Einschränkung dieser Arbeitsprozesse kann ein wesentlicher Beitrag zur Verhältnis-Prävention durch Assistenzsysteme wie Exoskelette geleistet werden. Dabei soll die körperliche Belastung verringert werden, ohne die Prozesskontrolle durch den Nutzer einzuschränken.

Eine mechanische Unterstützung des menschlichen Bewegungsapparates findet seit Langem Anwendung in der Medizin bei der Rehabilitation von neurologischen und orthopädischen Patienten, aber auch in der Industrie zur körperlichen Entlastung von Arbeitnehmern. Die militärische Anwendung fokussiert sich auf die Weiterentwicklung zu Exosuits (Ganzkörper-Exoskelette). Aktuell gibt es vielfältige Lösungsansätze für Exoskelette. Diese können nach unterschiedlichen Klassifikationskriterien (siehe Abb. 1) unterschieden werden. Die offensichtlichste Kategorie ist die anatomische Zuordnung. Handelt es sich bei dem Exoskelett um eine Unterstützung des „Upper body“ (Oberkörper und Oberextremität) oder von Teilen davon (z. B. CAPIO Dual Arm Exoskelett [Mallwitz et al. 2015], Robo-Mate-Exoskelett [Stadler et al. 2016]), des „Lower body“ (Beckenring und Unterextremitäten - das Abdomen wird unterschiedlich zugeordnet) oder Teilen davon (z. B. Chairless Chair [Noonee 2018], Hybrid Assistive Limb - HAL<sup>®</sup> [Sankai 2010]) oder wird der gesamte Bewegungs-

apparat (z. B. suitX MAX [US Bionics 2018], XOS 2 [Karlin 2011]) unterstützt? Die bisher existierenden Lösungen sind meist Individuallösungen mit teils starren Konstruktionen unter hohem Materialeinsatz, die nur eine bedingte Mobilität bieten.

Weiterhin fehlt eine hinreichende Marktdurchdringung durch die bestehenden Systeme, da diese weitestgehend Insellösungen mit geringer flexibler Einsetzbarkeit bei gleichzeitig hohen Kosten darstellen. Viele Exoskelette sind entweder an ein Individuum angepasst oder stellen eine Einzellösung für einen bestimmten Prozess oder Problem dar. Durch eine Standardisierung ist ein Einsatz durch mehrere Nutzer für verschiedene Aufgaben denkbar. Dieser Standard soll über Modularisierung, Skalierung und Adaptivität erreicht werden.



**Abbildung 1:** Klassifikationskriterien für Exoskelette – abgeleitet aus Recherchen zur Literatur seit 1965

## 2. Konzept

### 2.1 Kernpunkte

Das im Rahmen des Projekts LEVIAKTOR zu entwickelnde Exoskelett realisiert eine physische Unterstützung (Assistenzsystem) und stellt keinen robotischen Ersatz (Substitutionssystem) dar. Geplant ist eine aktive mechanische Unterstützung der Oberextremität, d. h. des Hand-Arm-Schulter-Systems, mit Abstützung am Rumpf. Der Unterstützungsgrad soll bis zu 30 % der physiologischen Maximalkräfte umfassen, um die muskuläre Ermüdung bei Erhaltung der Trainingseffekte (wie Ausdauer und Feinmotorik) zu verzögern. Gleichzeitig soll während des ganzen Entwicklungsprozesses die Nutzerakzeptanz gesichert werden.

Nach Einordnung in die Klassifikationskriterien aus Abb. 1 ergeben sich die folgenden Anwendungsfelder. Wir erhalten ein Exoskelett zur Oberkörperunterstützung

mit haptischer Interaktion. Dabei erfolgt ein modularer Aufbau für einen mobilen, industriellen Einsatz. Die primäre Nutzerschnittstelle bilden Sensoren, deren Daten über eine schnelle Regelung der elektromechanischen Antriebe die Unterstützung kontrollieren sollen. Gefördert als BMBF-Projekt erfolgt die Entwicklung für den industriellen Einsatz durch Industriepartner mit Unterstützung akademischer Forschungseinrichtungen.

## 2.2 *Konsortium*

Die Entwicklung wird von einem Konsortium aus in der Robotik aktiven Firmen, Anbietern von miniaturisierten Sensoren, Experten der Orthopädietechnik und Fachleuten aus der Hochschulforschung getrieben.

Neben der Projektkoordination übernimmt die Technische Universität Ilmenau (TU Ilmenau), Fachgebiet Biomechatronik, die Konzeptbildung für die biomechanische Systemintegration und begleitet die entsprechenden Umsetzungen. Gleichzeitig wird auf die Sicherung der Biokompatibilität inklusive der Usability geachtet und durch dafür geeignete Entwicklungsprozesse und –methoden unterstützt.

Das Klinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Abteilung Motorik und Pathophysiologie, bearbeitet den Schwerpunkt der Elektrophysiologie. Dies umfasst aktori-sche und sensorische Aspekte sowie Modelle für die Steuerung. Zusammen mit der TU Ilmenau und der Firma F. Gottinger Orthopädietechnik GmbH (Zorneding) sollen dabei biomedizinische und -technische Aspekte beachtet werden.

Das Robotiklabor der Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft (HS Aalen) erforscht Antriebsmodule zur frühzeitigen Erstellung funktionaler Muster. Unter Beachtung der Anthropometrie entwickelt die HS Aalen das Embodiment der mechanischen Schnittstellen und ist verantwortlich für Funktionstestungen, Verifikation und Replikationstechniken.

Dabei ist eine enge Zusammenarbeit mit der Firma F. Gottinger notwendig, welche sich um die technische Realisierung der mechanischen Mensch-Maschine-Interaktion kümmern und den Bau des Demonstrators umsetzen.

Die Firma LSK Engineering Services GmbH (Crailsheim) beschäftigt sich mit der elektrischen und informationstechnischen Umsetzung der Mensch-Maschine-Interaktion. Dabei stehen vor allem die Steuerung und Regelung, insbesondere die Dämpfung zur Vermeidung von Systemschwingungen, im Vordergrund. Hierfür müssen zeitkritische Prozesse, die Energieversorgung und die Sicherheitstechnik analysiert werden.

Die Firma BM Innovations GmbH (Hörgertshausen) soll im Rahmen des Projektes eine aufgabenangepasste Sensorisierung entwickeln, welche einen minimalen Bau-raum und eine minimale Stromversorgung benötigt. Dabei müssen auch strom-sparende und energieeffiziente Datenübermittlungsverfahren identifiziert werden.

Abschließend steht uns die Firma Schunk GmbH & Co. KG (Lauffen am Neckar) als assoziierter Partner zur Seite. Sie unterstützt uns durch die Fertigung skalierbarer Antriebsmodule mit mechanischen und elektrischen Schnittstellen.

## 2.3 *Lösungsprinzipien*

Das Konzept sieht eine Kombination aus einem mechatronischem Baukastensystem und der Einbindung von sEMG-Daten in ein multimodales Sensornetzwerk zur bedarfsgerechten Ansteuerung des Systems vor. Aufbauend auf standardisierten Elementen der Orthetik (Medizintechnik) erfolgt die Verknüpfung mit dem Sensor-

netzwerk, welches über eine adaptive Regelung die elektrodynamischen Antriebe ansteuern soll.

Neben der rein mechanischen Ankopplung und Sensorisierung erweitern wir das Systemkonzept mit elektrischen Komponenten. Nach einer Vorverarbeitung werden die Bewegungsdaten des Menschen zur Control Unit (CU; im Deutschen nur unvollkommen mit „Steuerung und Regelung“ beschrieben – diese operative Ebene wird in der „Control“ durch taktische und strategische Planung ergänzt) übertragen. Daraufhin erfolgt die Steuerung und somit die Aktuierung des Exoskeletts (zur Lastübernahme) über Motoren und Getriebe. Für die Regelung werden weitere Sensoren benötigt, welche die Exoskelettpositionierung und den Unterstützungsgrad überwachen und zur CU zurückmelden. Des Weiteren muss die CU aufgabengerecht Information aus der Umwelt erhalten und verarbeiten. Dieser aufwändige Prozess bedingt die Notwendigkeit einer schnellen Regelung. Das Exoskelett muss über Elemente der Orthetik sowie eine Abstützung am Rumpf an den Menschen angekoppelt werden. Außerdem sind definierte Benutzerschnittstellen zwischen Mensch und Maschine notwendig.

Der Systementwurf erfolgt nach VDI 2206 [2004; derzeit in Überarbeitung]. Dabei werden ausgehend von einem gesamtheitlichen Systementwurf Teilfunktionen identifiziert und Schnittstellen definiert. Danach steht der domänenspezifische Entwurf im Fokus. Neben der Sicherung der Biokompatibilität wird auf eine stetige Iteration geachtet.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Das Exoskelett LEVIAKTOR interpretiert die Signale des Nervensystems für die Muskeln und übernimmt unter deren Kommando mechatronisch definierte Anteile der Last. Durch den Abgriff der Muskelaktivität zur Ansteuerung und durch die Skalierbarkeit der Baukastenkomponenten soll eine schnelle Anpassbarkeit des Exoskeletts an verschiedene Individuen und damit die Mehrfachnutzbarkeit der Technik ermöglicht werden. Das modulare Exoskelett ist für den Einsatz in der Arbeitswelt vorgesehen.

Ausgehend von dem gesamtheitlichen Systementwurf nach VDI 2206 soll über iterative Entwicklungen der Komponenten und des Gesamtsystems ein Demonstrator umgesetzt werden. Diesen Prozess werden kontinuierlich Nutzertests begleiten.

### 4. Literatur

- Karlin S (2011) Raiding Iron Man's closet [Geek Life]. In: IEEE Spectrum vol. 48 no. 8:25.
- Mallwitz M, Will N, Teiwes J, Kirchner EA (2015) The CAPIO Active Upper Body Exoskeleton and its Application for Teleoperation. In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA-2015), ESA.
- Noonee (2018) Produktvorstellung Chairless Chair. <https://www.noonee.com/produktvorstellung> (15.12.2018).
- Sankai Y (2010) HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics. In: Kaneko M, Nakamura Y (eds) Robotics Research. Berlin, Heidelberg: Springer, 66:25-34.
- Stadler K, Altenburger R, Schmidhauser E, Scherly D, Ortiz J, Toxiri S, Mateos L, Masood J (2016) Robo-Mate: An exoskeleton for industrial use – concept and mechanical design. In: 19<sup>th</sup> International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines, London, UK.

US Bionics (2018) Produktvorstellung suitX MAX (Modular Agile eXoskeleton). <https://www.suitx.com/max-modular-agile-exoskeleton> (15.12.2018).

VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2004) VDI-Richtlinie VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag.

**Danksagung:** Dieses Forschungsprojekt „Muskelgesteuertes Exoskelett zur Kraftunterstützung (LEVIAKTOR)“ (Förderkennzeichen: 16SV8004) wird mit Mitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## **Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten**

65. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Professur Arbeitswissenschaft  
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme  
Technische Universität Dresden

Institut für Arbeit und Gesundheit  
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

27. Februar – 1. März 2019

---

## **GfA-Press**

---

**Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019**

**Professur Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,  
Technische Universität Dresden;  
Institut für Arbeit und Gesundheit, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Dresden**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.  
Dortmund: GfA-Press, 2019  
ISBN 978-3-936804-25-6

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

**Schriftleitung: Matthias Jäger**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

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

- den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband 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.

**Screen design und Umsetzung**

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

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