

## Entwicklung eines modularen Antriebssystems zur universellen Einbindung in Exoskelette

Johannes WANNER, Matthias HAAG

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

**Kurzfassung:** Ein wesentlicher Nachteil der sich auf dem Markt befindlichen Exoskelette, ist die nicht ausreichend vorhandene Flexibilität in Bezug auf den Arbeitseinsatz. Die Systeme sind explizit für eine Anwendung konzipiert. Erweiter- und/oder anpassbare aktive Exoskelette für möglichst alle im Alltag die Gesundheit belastende Tätigkeiten gibt es nicht. Ziel ist die Entwicklung modularer, für unterschiedliche Einsatzgebiete in Industrie und Handwerk geeigneter Antriebseinheiten für aktive Exoskelette. In einem ersten Schritt zur Kompensation der körperlichen Belastung im Bereich des Ellenbogengelenks. In einem weiteren Schritt jedoch wandelbar für einen universellen Einsatz am menschlichen Körper.

**Schlüsselwörter:** Exoskelett, Arbeitssystem, Antriebssystem, Prävention, Arbeitsschutz, Gesundheit

### 1. Einleitung

Die aktive mechanische Unterstützung des menschlichen Bewegungsapparates findet Anwendung nicht nur in der Medizin, sondern auch in Industrie und Handwerk zur vorbeugenden körperlichen Entlastung von Arbeitnehmer/innen.

Exoskelette werden hier explizit zur Unterstützung der Gelenke und der Muskulatur eingesetzt. Unter Berücksichtigung des Anwendungsgebiets ist in aktive und passive Systeme zu unterteilen. Aktive Systeme verfügen über Sensorik und Regelungseinheiten, welche entsprechende Signale an die Aktoren des Exoskeletts übermitteln. Die Erforschung der Mechanik, Steuerung, Regelung und Sensorik erfolgt im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes LEVIAKTOR (Förderkennzeichen: 16SV8005), gemeinsam mit anderen Projektpartnern. In dieser Arbeit werden die mechanischen und elektrischen Komponenten zur rationellen Bereitstellung von modularen Antriebseinheiten erforscht.

### 2. Problemstellung und Zielsetzung

Ziel ist es eine Entlastung, insbesondere gesundheitserhaltende Unterstützung während und zwischen Arbeitsschritten mit Hilfe aktiver Exoskelette zu erlangen. Diese sind dahingehend noch nicht hinreichend erforscht.

Ein wesentlicher Nachteil der hier auf dem Markt befindlichen Systeme ist zum einen die nicht ausreichend vorhandene Flexibilität. Die Systeme sind explizit für eine Anwendung, beispielsweise Heben schwerer Lasten oder der Überkopfarbeit ausgelegt. Dementsprechend sind Ansteuerung und Konstruktion zweckmäßig konzipiert, was meist eine spezifische Hard- und Software nach sich zieht. Die Ansteuerung der Aktorik wird über Kräfte, welche durch den Werker/in zuvor in das System über

Druck- oder Momentensensoren eingeleitet werden müssen, realisiert. Somit ist die tatsächlich benötigte Unterstützung nicht zwangsweise die, die auch für den aktuellen Bewegungsablauf erforderlich ist. Überschwingen des Systems durch nicht bedarfsgerechte Regelung (nicht Bestandteil der hier präsentierten Forschung) und Elastizität der mechanischen Komponenten können das Empfinden gegen das Exoskelett zu agieren fördern. Zur Erreichung einer Akzeptanz muss sich die technische Lösung an den Bedürfnissen, wie Tragekomfort, Bedienung, subjektives Empfinden und optisches Erscheinungsbild orientieren.

Die aktuell auf dem Markt vorhandenen Antriebe müssen aufwendig sowohl an die Orthese wie auch an den Werker/in angepasst werden. Dies gilt in Bezug auf die Gelenkposition, die zu unterstützende Kraft sowie für die definierte Aufgabe. Durch die hieraus resultierende nahezu immer notwendige Neuentwicklung und das Arbeiten mit nicht standardisierten Komponenten erhöht sich der Entwicklungs- und Konstruktionsaufwand, sowie die Zeit zur Realisierung.

Ziel der hier präsentierten Arbeit ist die Entwicklung modularer, für unterschiedliche Einsatzgebiete in Industrie und Handwerk geeignete Antriebseinheiten für aktive Exoskelette. In einem ersten Schritt dienen diese zur Kompensation der körperlichen Belastung im Bereich des Ellenbogengelenks, in einem weiteren Schritt jedoch wandelbar für einen universellen Einsatz am menschlichen Körper.

Generell ist ein biokompatibler und zugleich robuster, konturnaher und gewichtsreduzierter Aufbau erforderlich. Deswegen werden die Antriebseinheiten auf Latenzzeit  $<100$  ms, basierend auf der elektromechanischen Verzögerung der menschlichen Skelettmuskulatur (Thomas Jöllenbeck 2002), Drehmoment, Geschwindigkeit, Regelbarkeit und Baugröße zur Anwendung des spezifischen Einsatzbereichs unter Berücksichtigung der Modularität untersucht und angepasst. Das zu unterstützenden Arbeitsgewicht von 5 kg an der Hand, entspricht 17,5 Nm am Ellenbogen und Arbeitsgeschwindigkeit 0,5 U/s (am Ellenbogengelenk) sind vorerst von einem Basisversuch abgeleitete Werte.

### 3. Vorgehensweise

Zu Beginn wurde im Projektteam ein vorläufiger Anforderungskatalog erstellt. Ergänzend wurde ein Basisversuch durchgeführt. Dieser dient zur Ermittlung von Bewegungsmustern und der Erhebung von elektromyographischen Daten [EMG], Beschleunigungen der oberen Extremitäten, sowie Analyse der Reaktionskräfte. Hierauf aufbauend wurde innerhalb eines Expertenteams unter Anwendung des paarweisen Vergleichs eine Priorisierung der anzustrebenden Eigenschaften, des Exoskeletts, sowie deren Bewertung erarbeitet.

Möglichst frühzeitig wird eine erste Experimentierplattform zur praktischen Erprobung der Antriebskonzepte, sowie geeigneter Schnittstellen explizit im Bereich des mechanischen Gelenks und der Krafterleitung des Antriebs in die Orthese geschaffen. Als Basis hierfür dienen Orthesenschalen, sowie ein in der Orthopädiotechnik bewährtes mechanisches Gelenk. Die Orthese kann so nach Stand der Technik handwerklich vom Orthopädietechniker angefertigt werden.

Anbindungen für die Aktorik, Versteifungen und unterstützende Elemente können durch die Rückführung in den virtuellen Raum direkt an der Orthese entwickelt werden. Gleichzeitig bietet dies die Möglichkeit der praktischen Kräfte- und Momentenanalyse und somit einer systematischen Entwicklung.

Um die Erforschung von leistungsdichten Antrieben strukturiert zu gestalten, wird

zusätzlich zur Orthese ein hierzu passender Dummyarm auf Basis realer Anthropometrie entwickelt. Dieser wird für Versuche mit Sensorik versehen. Somit können Reaktionskräfte zwischen Arm und Exoskelett frühzeitig berücksichtigt werden (Biokompatibilität).

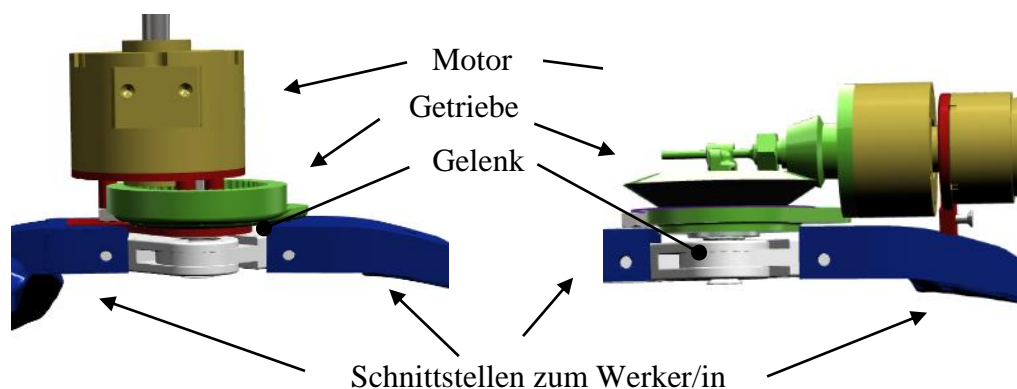
Durch die Digitalisierung der realen Orthese mittels 3D Scanner wird präventiv eine digitale Entwicklung ohne die Gefährdung der Gesundheit von Probanden stattfinden. Nach jeder Fertigstellung einer Entwicklungsstufe des Exoskeletts, werden entsprechende Versuche am Dummyarm und in Realität mit dem Werker/in anhand des Basisversuchs durchgeführt.

Ist ein tauglicher Demonstrator geschaffen, geeignete Antriebs- und Übertragungseinheiten erforscht, werden diese Erkenntnisse zur Übertragung auf weitere Gelenke referenziert. Hier sind neue Herausforderungen in Bezug auf die höheren Lasten und geänderte Bauformen explizit im Schulterbereich durch ein Mehrachssystem zu erwarten.

Eine gesamtheitliche Validierung des Exoskeletts in Bezug auf Ansteuerung, Handhabbarkeit und Akzeptanz wird parallel als Teil der Erforschung durchgeführt.

#### 4. Status quo

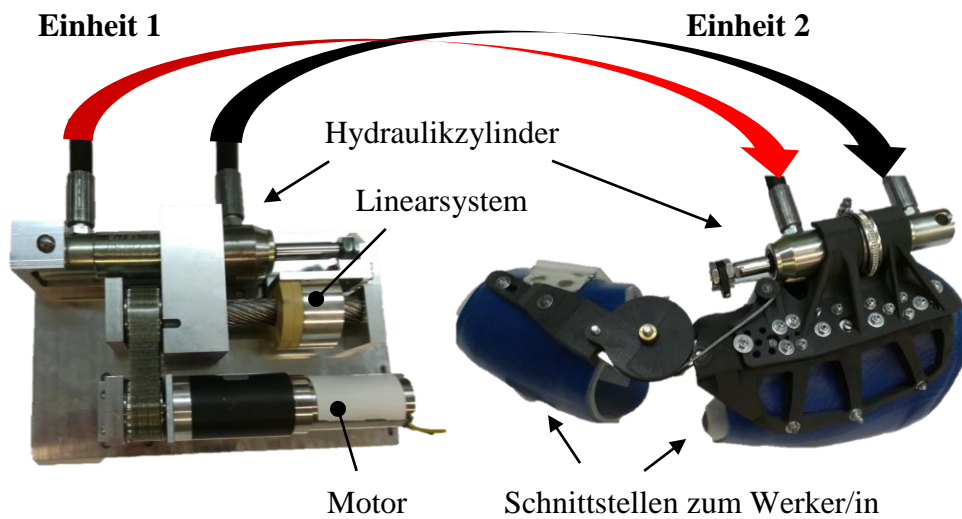
Auf Basis der anzustrebenden Eigenschaften wurden Konzepte entworfen, überprüft und bewertet. Als mechanisches Gelenk, zur Übertragung der Leistung des Antriebssystems auf den menschlichen Arm, wurde ein in der Praxis bereits bewährtes Gelenk aus dem Orthesenbau innerhalb einer FEM Analyse auf seine Belastbarkeit und somit die potenzielle Basis für eine Erweiterung zu einem aktiven Exoskelett untersucht. Im Fokus wurde hier die Belastbarkeit, aber auch die Verformung des Gelenks auch unter aktivem Kräfteinfluss überprüft. Eine ausreichende Steifigkeit und Belastbarkeit ist mit den aus Kapitel 2 genannten Kräften gegeben. Eine Evaluation der Antriebe ermöglicht in Kombination mit Getriebeelementen die in Abbildung 1 gezeigten Konzepte mit am Ellenbogengelenk montiertem Antrieb.



**Abbildung 1:** Antriebssystem links axiale, rechts winkelversetzte Antriebsanbindung.

Es wird festgestellt, dass bei diesen Konzepten eine konturnahe und somit für den Werker/in störungsarme Positionierung des Antriebes nicht realisierbar. Dies ist insbesondere auf die dann entstehende Bauhöhe und das Gewicht zurückzuführen.

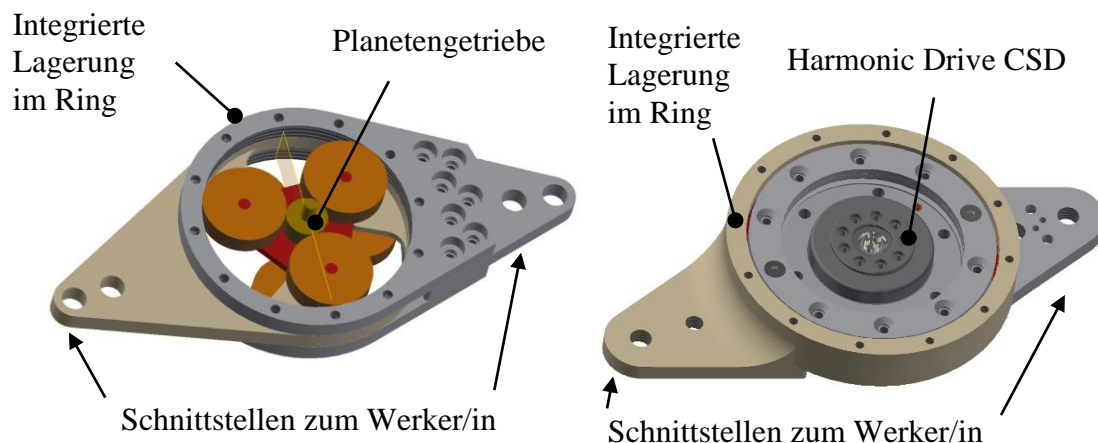
Eine erste Strategie ist die Verlagerung des Aktors, wie sie auch bei Handachsen von Knickarmrobotern zum Tragen kommt. Abbildung 2 zeigt ein mit hydraulischen Standardkomponenten entwickeltes System aus zwei Einheiten.



**Abbildung 2:** hydraulisches Antriebssystem zum Einsatz im Exoskelett mit dezentral positionierbarem Aktuator

Die Einheit 1 kann an eine weniger störende Position bspw. am Rücken in ein Trägersystem ausgelagert werden. Einheit 2, als am Arm mitbewegter Teil, weist ein potenziell geringes Gewicht, einen kleinen Bauraum und eine hohe Dynamik auf. Beim Funktionsmodell, Abbildung 2, wird der hydraulische Druck über eine Gewindespindel und einen Elektromotor mit Getriebe erzeugt. Die bereits durchgeführten Versuche lassen darauf schließen, dass eine für die Regelbarkeit ausreichende Systemsteifigkeit gegeben ist. Da hier mit standardisierten und großzügig dimensionierten Hydraulikzylindern gearbeitet wurde, konnte die Leistungsfähigkeit des Systems überprüft werden, jedoch sind Abmessungen und Gewicht zu skalieren.

Eine zweite Strategie, Abbildung 3, ist die Zusammenführung von Getriebereinheit und Gelenk. Für die Robotik werden Einbausätze mit integrierter Lagerung angeboten. Diese sind, unter anderem aufgrund des Gewichts und der Baugröße, nur bedingt einsetzbar.



**Abbildung 3:** Gelenk mit koaxialem integriertem Getriebe, links Planetengetriebe, rechts Harmonic Drive Getriebe

Hieraus ergibt sich eine zum Werker/in konturnahe Konstruktion des Gelenks. Durch die hohe Untersetzung bspw. eines zweistufigen Planetengetriebes [PG] (links) oder aber eines Harmonic Drive [HD] Getriebes (rechts) kann auf eine direkt am Motor befindliche Getriebestufe verzichtet werden. Kleinere und leichtere Motoren können eingesetzt werden, da das geforderte Drehmoment erst in der letzten Stufe des Planetengetriebes bzw. im HD Getriebe erzeugt wird. Eine koaxiale Positionierung der Antriebsmotoren zum Getriebe ist aus Platzgründen weiterhin nicht sinnvoll. Eine erste Lösung ist die Umlenkung des Antriebsmoments mittels Kronenradsatz, eine Zweite die achsparallele Anordnung des Motors und Leistungsübertragung mittels Trumm, beides in Abbildung 3 nicht dargestellt. Der Einsatz von Torquemotoren bleibt als Option.

## 5. Diskussion

Alle hier erläuterten Konzepte sind mit einem hohen Maß an standardisierten Elementen fertig- und montierbar. Auch wurde die angestrebte Modularität und die abhängig vom Einsatzzweck optionale Auslegung der Aktorik berücksichtigt. Hierzu zählen die flexiblen Schnittstellen zum Werker/in, verschiedene Baugrößen des HD Getriebes bzw. die Skalierbarkeit des PGs und die zweckmäßige Anbindung der Elektromotoren in zugehöriger Leistungsstufe. Erste praktische Messungen wurden bereits im Labor vorgenommen. Explizit wurden hier die Kraft- und Zeitmessungen mit dem Hydrauliksystem durchgeführt. Das geforderte Moment, 17,5 Nm, wurde erreicht. Ebenso konnte die erforderliche Drehgeschwindigkeit des Exoskeletts im Ellenbogen auf 0,45 U/s referenziert werden. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse fließen bereits in weitere Konzepte bzw. deren Anpassung ein. Anschließend müssen die in der Anforderungsliste aufgeführten Risiken, welche während der Nutzung auftreten können, beispielsweise Verhalten des Exoskeletts bei Sturz des Werkers/in, Missbrauch oder Fehlfunktion, zuverlässig erforscht und Lösungen erarbeitet werden. Eine elektrische und / oder mechanische Kupplung zur Unterbrechung des Kraftflusses zwischen Motor und Gelenk bei Fehlfunktion ist angedacht. Eine vollumfängliche Evaluation der Systeme, auch in Bezug auf die beim Basisversuch erhobenen Werte wird erfolgen.

## 6. Literatur

- DIN 33402-2 (2005) Ergonomie Körpermaße des Menschen Teil 2: Werte. ICS 13.180  
Fachbereich Handel und Logistik der DGUV (2018) Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen. Zeitschrift DGUV 02/2018, FBHL 006.  
Faulhaber (2018) Antriebssysteme. Produktkatalog.  
Harmonic Drive AG (2016) Projektierungsanleitung Einbausätze CSD-2A. Online pdf.  
Thomas Jöllenbeck (2002) Die elektromechanische Verzögerung der menschlichen Skelettmuskulatur. Buch Verlag Dr. Kovac, Hamburg 2002, 368 Seiten, ISBN 978-3-8300-0656-5.  
Moritz Maier (2015) Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau, Dissertation vom Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen.  
Robert Weidner, Tobias Redlich, Jens P. Wulfsberg (2015) Technische Unterstützungssysteme. Buch Springer Vieweg ISBN 978-3-662-48382-4.  
VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (1997) Konstruktionsmethodik Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien VDI 2222. ICS03.100.40.

**Danksagung:** Mein Dank gilt dem Projektträger, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung. Ein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder von der TU Dresden und Prof. Dr.rer.nat. Matthias Haag von der Hochschule in Aalen. Des Weiteren möchte ich mich beim Konsortium LEVIAKTOR, bestehend aus Technischen Universität Ilmenau Biomechatronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, BM Innovations GmbH, Orthopädietechnik Gottinger, LSK Engineering Services GmbH und dem Robotiklabor der Hochschule Aalen für die konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Die Firma Faulhaber stellte zur Überprüfung der ersten Konzepte einen Antrieb zur Verfügung, die Firma Schunk, welche sich zur Fertigung der Einzelkomponenten bereit erklärt hat, sowie der Harmonic Drive AG gilt ebenfalls mein verbindlichster Dank.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## **Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?**

66. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin  
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin  
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

---

## **GfA-Press**

---

**Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020**

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme  
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.  
Dortmund: GfA-Press, 2020  
ISBN 978-3-936804-27-0

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 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.

**Screen design und Umsetzung**

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

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