

## Informationen zum Referenten

**Dr. sc. techn.  
Konrad Stadler**



### **Aktuelle Position**

Dozent für Regelungstechnik  
Institut für Mechatronische Systeme  
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, Schweiz  
<http://www.ims.zhaw.ch>  
[konrad.stadler@zhaw.ch](mailto:konrad.stadler@zhaw.ch)

### **Ausbildung**

Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz und University of Edinburgh, Schottland

- Elektrotechnik, Dipl. El.-Ing. ETH

Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz

- Regelungstechnik, Dr. sc. techn.

### **Berufliche Meilensteine**

ABB Schweiz AG, Baden-Dättwil, Schweiz

- Konzernforschung 2004-2012

# Exoskeletons – Von der akademischen Vision zur industriellen Anwendung

Dr. Konrad Stadler, Institut für Mechatronische Systeme, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

## Zusammenfassung

Roboter sind in der industriellen Produktion allgegenwärtig. Sie arbeiten typischerweise völlig autonom. Traditionell sind Interaktionen mit den bedienenden Menschen nur in „Sonderfällen“, wie beispielsweise bei Störungen, vorgesehen. Je produktiver ein Produktionsschritt ist, desto weniger flexibel ist er. Der Produktionsschritt kann somit nicht oder nur schwer an andere Produkte angepasst werden.

Die wissenschaftliche Forschung entwickelt sehr enge Formen der Mensch-Roboter Interaktion. Diese können den Produktionsprozess wesentlich flexibler und adaptiver gestalten, stellen aber bezüglich Sicherheit neue Anforderungen. Noch weiter geht man, wenn man den Roboter mit dem Menschen verschmelzen lässt. Dazu werden sogenannte angetriebene Exoskelette verwendet.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Methoden und Konzepte, die bei Exoskeletten zur Anwendung kommen, und stellt die aktuellen Anwendungsgebiete der industriellen Anwendung gegenüber. Die Herausforderungen, Exoskelette in einem industriellen Umfeld anzuwenden, werden anhand eines aktuellen Projekts dargestellt.

## 1. Einleitung

### 1.1 Produktionseffizienz versus Produktionsflexibilität

Aus Effizienz- und Kostengründen orientiert sich heute die industrielle Produktion sehr stark an automatisierten Produktionsschritten. Dabei werden Roboter in allen Formen und Fähigkeiten eingesetzt. Aus Kostengründen haben diese nur eine relativ kleine Anzahl von Sensoren und Aktuatoren. Daher müssen diese Produktionsschritte genau entworfen und umgesetzt werden. Änderungen bezüglich Produkten und Abläufen sind daher oft mit signifikanten Produktionsunterbrüchen verbunden.

Im Gegensatz dazu haben Menschen eine redundante Anzahl an Sensoren, das heisst es werden auch Dinge wahrgenommen, die nicht direkt mit einem Produktionsschritt in Verbindung stehen. Daher können zum Beispiel gefährliche Situationen früh erkannt und verhindert werden. Um solche Situationen bei Robotern zu verhindern, werden diese oft „eingesperrt“ und während des Produktionsprozesses findet keine Interaktion zwischen dem Roboter und dem Bediener statt.

Ein grosses Thema in der Forschung und Entwicklung ist die Verbesserung der Flexibilität ohne die Produktionsrate zu vermindern. Hier geht es zum Beispiel um Lernprozesse, das heisst wie Produktionsschritte durch Vormachen vom Bediener sehr einfach und schnell vom Roboter erkannt und gelernt werden können, ohne dass dieser neu programmiert werden muss. Dazu muss notwendigerweise der Sicherheitsabstand reduziert werden. Diese enge Mensch-Roboter-Interaktion führt zu neuen Aspekten bezüglich Sicherheit.

Im Gegensatz dazu stehen Produktionen mit kleinen Stückzahlen, die eine relativ geringe Produktionseffizienz und eine hohe Produktionsflexibilität aufweisen. Daraus resultieren meist teure Produkte. Gründe für die mangelnde Produktionseffizienz liegen in einer zu hohen Variabilität der Produkte oder in komplexen schwer zu automatisierenden Produktionsschritten. In diesen Fällen sind wenige Produktionsschritte automatisiert, da die Wirtschaftlichkeit dafür nicht gegeben ist. Produktionseffizienz steht also im Widerspruch zur Produktionsflexibilität. Für Produktionen mit kleinen Stückzahlen wird der wirtschaftliche Druck zunehmen und damit die Bedeutung der Produktionseffizienz.

### 1.2 Angetriebene Exoskelette

Als eine Möglichkeit Flexibilität und Produktionseffizienz zu vereinen, gelten Exoskelette. Gemäss Duden<sup>1</sup> ist ein Exoskelett ein

*den Körper umschliessendes Skelett bei Wirbellosen und Wirbeltieren,*

also eine aussenliegende, formgebende Struktur für einen Körper. Auch in den meisten anderen Lexika findet man keine andere Bedeutung. Ganz anderes ist die Wahrnehmung in den elektronischen Medien. Zum Beispiel gibt es unzählige Beiträge über Anwendungen von Exoskeletten in der Medizin. Zum einen werden diese in der Rehabilitation und als Unterstützung bei Behinderungen eingesetzt. Richtigerweise müsste man von „angetriebenen Exoskeletten“ sprechen, da diese nicht nur passiv und formgebend sind, sondern auch aktiv in die Bewegungen eingreifen können. Das Exoskelett besteht also aus Gliedern und Gelenken, die mit den menschlichen Gliedern und Gelenken in Verbindung stehen, dabei wird insbesondere das Moment, das durch das Exoskelett erzeugt wird, auf den Mensch übertragen (Gopura et al., 2011). Exoskelette gehen also eine sehr enge Interaktion zwischen Mensch und Roboter ein. Gerade diese Übertragung von Kraft auf den menschlichen Körper kann zum einen gewünscht sein wie in der Rehabilitation oder soll vermieden werden wie in der industriellen oder militärischen Anwendung. In dem von uns geplanten Einsatz in der industriellen Produktion soll das Exoskelett

<sup>1</sup> <http://www.duden.de/rechtschreibung/Exoskelett>

den Menschen bei schweren Tätigkeiten entlasten. Dadurch kann der menschliche Einsatz verlängert und gesundheitlichen Beeinträchtigungen oder Verletzungen vorgebeugt werden. Es wird erwartet, dass in Zukunft angetriebene Exoskelette in der Kraftunterstützung, in der Rehabilitation sowie in Teleoperationsanwendungen mit haptischer Interaktion und virtueller Realität eine wichtige Rolle einnehmen werden (Gopura et al., 2011).

## 2. Anwendungen von Exoskeletten

Um eine Übersicht über die Anwendungen von Exoskeletten zu geben, gibt die folgende Analyse einer Literatursuche Auskunft. In *Google Scholar*<sup>2</sup> wurde nach dem Begriff „Exoskeleton“ gesucht. Aus den etwa ersten 50 Treffern wurden diejenigen Artikel ausgesucht, zu denen der vollständige Artikel vorlag (39 Artikel). Diese Artikel wurden auf verschiedene Anwendungsgebiete und Charakteristika des Exoskeletts untersucht. Die Literatursuche erhebt also keinen Anspruch auf Vollständigkeit, erlaubt aber aus Sicht des Autors einige Einblicke in das Themengebiet.

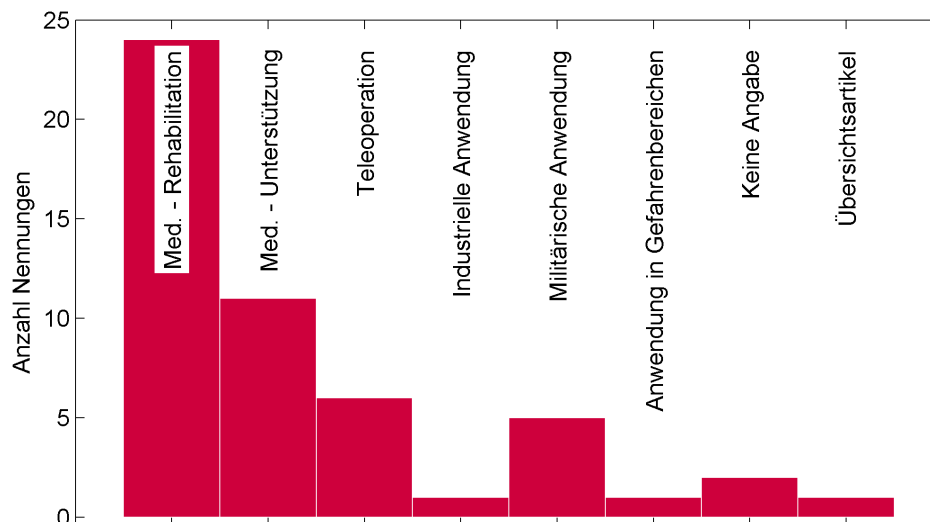


Abbildung 1: Anzahl Nennungen der verschiedenen Anwendungsgebieten von Exoskeletten in einer Auswahl von Publikationen. Mehrfachnennungen sind möglich.

In Abbildung 1 ist die Anzahl der Nennungen von verschiedenen Anwendungsgebieten von Exoskeletten aufgezeigt. Die meisten Nennungen hatten - wie schon erwähnt - die medizinischen Anwendungen (Rehabilitation und Unterstützung). Für die beiden Anwendungsgebiete sind auch kommerzielle Produkte erhältlich. Die bekanntesten werden durch Firmen wie Hocoma AG (Volketswil, CH) oder Ekso Bionics (Richmond, CA, früher unter dem Namen Berkeley Bionics bekannt) entwickelt und vertrieben (Lunenburger et al., 2005; Mertz, 2012; Riener, 2009; Strickland, 2012). Daneben haben die militärischen Anwendungen ebenfalls ausgereifte Produkte, wie HULC® von der Lockheed Martin Corporation (*HULC® - Exoskeletons Enhance Mobility and Increase Endurance*, 2012), die vor allem zum Tragen von schweren Gegenständen über lange Distanzen geeignet sind. Zu diesen 39 wissenschaftlichen Artikeln haben 47 verschiedene Institutionen beigetragen. Daraus haben sich aber nur wenige Produkte tatsächlich bis zur Marktreife entwickelt. Neben diesen Anwendungen gibt es eine ganze Reihe von Einsatzmöglichkeiten, bei denen noch keine nennenswerten Produkte vorhanden sind. An dieser Stelle seien die Ideen bezüglich Teleoperation erwähnt, die seit gut 20 Jahren verfolgt werden (Berga-

<sup>2</sup> <http://scholar.google.ch/>

masco et al., 1994). Andere Anwendungsgebiete wie die industrielle Anwendung oder die Anwendung von einem Exoskelett in Gefahrenbereichen (zum Beispiel als Unterstützung für die Feuerwehr) werden seit langem schon als zukünftige Anwendung (Frisoli et al., 2005) zur Rechtfertigung der entsprechenden Forschung erwähnt.

Warum haben sich also in einigen Anwendungsgebieten marktreife Produkte entwickeln können, in anderen hingegen nicht, obwohl die Ideen und das entsprechende Interesse der Wissenschaft vorhanden waren? Um dieser Frage nachzugehen, ist es nötig, die Anwendungsgebiete etwas genauer zu betrachten.

## **2.1 Medizinische Anwendungen (Rehabilitation und Kraftunterstützung)**

Im medizinischen Bereich lassen sich zwei Anwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen unterscheiden, nämlich die Rehabilitation und die Kraftunterstützung (in Abbildung 1 als Med. – Rehabilitation und Med. – Unterstützung bezeichnet).

Bei der Rehabilitation geht es insbesondere darum, dass Patienten gewisse Bewegungsabläufe wieder erlernen. Patienten mit zentralmotorischen Lähmungen werden mit Bewegungstherapien behandelt. Dabei wird durch ein häufiges, repetitives Bewegen von Körpersegmenten die Lern- und Anpassungsfähigkeit des Gehirns und Rückenmarks genutzt (Riener, 2009). Das Exoskelett wird also verwendet, um mit dem Patienten eine vordefinierte Bewegung möglichst oft zu wiederholen. Dazu kommt – da es sich um einen therapeutischen Einsatz handelt – dass dieser stets an einem Ort durchgeführt werden kann. Es wird also kein mobiles Exoskelett verlangt, was einen grossen Einfluss auf die Ausführung des Exoskeletts hat. Daher können diese mit wenig Gewichts- und Grössenbeschränkungen konzipiert sowie entwickelt werden und stets vom Netz mit elektrischer Energie versorgt werden. Solche Exoskelette gibt es für die Hand (e.g. Ruiz et al., 2006), für den Arm (e.g. Nef et al., 2007) oder für die Beine (e.g. Banala et al., 2009).

Bei der Kraftunterstützung dagegen geht es um die Unterstützung von Bewegungen, die durch eine unheilbare Erkrankung oder Schwächung nicht mehr oder nicht mehr genügend vom Patienten ausgeführt werden können. Dies kann also eine querschnittsgelähmte Person sein, die mit Hilfe eines Exoskeletts wieder aufrecht stehen und gehen kann (Strickland, 2012). Es kann aber auch eine altersbedingte oder unfallbedingte Schwächung von Muskeln sein, die durch ein Exoskelett die nötige Unterstützung erhalten, die Bewegung wieder auszuführen. Diese können relativ einfach aber nicht weniger wirkungsvoll konzipiert sein, wie zum Beispiel die Verstärkung der Greifkraft (Nilsson et al., 2012). Im Gegensatz zur Anwendung in der Rehabilitation sind hier die Exoskelette auf eine möglichst leichte Bauweise angewiesen. Diese müssen aus Mobilitätsgründen mit Batterie betrieben werden. Erschwerend kommt dazu, dass die Bewegung nicht vordefiniert ist, das heisst es muss eine Interaktion zwischen dem Patienten und dem Exoskelett stattfinden, damit dieses die gewünschte Bewegung ausführen kann. Gleichzeitig muss die Maschine bzw. das technische Verfahren eine hinreichende Autonomie besitzen, um den Patienten von den komplexen Aufgaben der Bedienung, Situationserkennung und Situationsreaktion zu entlasten (Riener, 2009). Um die Intension des Patienten an die Steuerung und Regelung des Exoskeletts weiterzugeben, wird teilweise auf das Elektromyogramm (EMG) bestimmter Muskeln zurückgegriffen (Kiguchi et al., 2004; Mulas et al., 2005).

## **2.2 Militärische Anwendungen**

Ohne Ausnahme geht es bei dieser Anwendung um die Unterstützung von Soldaten beim Tragen von schweren Lasten über weite Strecken (Kazerooni et al., 2005; Walsh et al., 2006). Dabei wird die Last vom Exoskelett aufgenommen. Die Bewegung ist also beschränkt auf die Gehfunktion, die unter Umständen durch variable Terrains eine grosse Herausforderung darstellen kann. Bei allen Ausführungen steht der Soldat auf einer Art zweiten Sohle. Damit wirken die Eigenlast des Exoskeletts sowie die Traglast nicht auf den Soldaten. Die Mobili-

tät ist durch das Mitführen von Batterien gewährleistet. Bei diesem System darf sich der Schwerpunkt der Last nicht wesentlich verschieben, da sonst Bewegungen entstehen, die nicht aufgefangen werden können.

### 2.3 Teleoperation

Die Teleoperation, auch Telemanipulation genannt, ist zum Beispiel für den Unterhalt von schlecht zugänglichen Systemen und Anlagen wie auf offshore Ölplattformen (Anisi and Skourup, 2012) von Bedeutung. Bewegungen des Bedieners werden dabei vom Exoskelett aufgenommen, um einen entfernten Aktuator (zum Beispiel einen Industrieroboter (Lee et al., 1999)) fernzusteuern. In einer ersten Ausprägung ist das Exoskelett nur ein passiver Sensor. Komplizierter wird es, wenn der Bediener eine haptische Rückmeldung vom entfernten Aktuator erhalten soll (Frisoli et al., 2005). Das heisst, stösst der Aktuator auf einen Widerstand, bildet das angetriebene Exoskelett diesen Widerstand nach, sodass der Bediener dies spüren kann. Ähnlich wie bei der Anwendung in der Rehabilitation, hat es in dieser Anwendung nur bedingte Grössen- und Gewichtsbeschränkungen und zudem muss das System nicht mobil sein. Typischerweise beschränkt sich diese Anwendung auf Exoskelette für Arme und/oder Hände.

### 2.4 Andere Anwendungen

Sehr wenige Publikationen erwähnen andere Anwendungen. In Umetani et al., 1999 wird vorgeschlagen, dass Exoskelette in der Industrie und in Gefahrenbereichen eingesetzt werden könnten (zum Beispiel im Weltall oder unter Wasser). Andere Autoren erwähnen zusätzlich die Anwendung bei Einsätzen der Feuerwehr oder bei Katastropheneinsätzen (Low et al., 2005; Pratt et al., 2004). Obwohl diese Anwendungen schon lange vorgeschlagen wurden, ist dem Autor ein konkreter Einsatz eines Exoskeletts in diesen Anwendungsbereichen nicht bekannt.

### 2.5 Analyse und Zusammenfassung

Bestimmte Anwendungen haben eine bevorzugte Ausprägung des Exoskeletts. Wie schon erwähnt konzentriert sich die militärische Anwendung auf Exoskelette, die mit den Beinen in Interaktion stehen. In der Rehabilitation findet man Exoskelette für die Arme, Beine und auch für die Hände. Die Anzahl Nennungen pro Art des Exoskeletts ist in Abbildung 2 gezeigt.

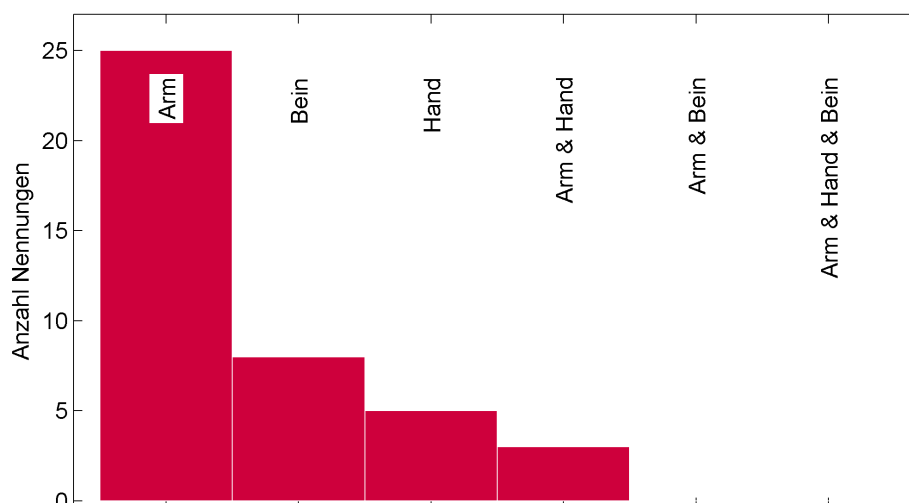


Abbildung 2: Anzahl Nennungen bezüglich der Art des Exoskeletts.

Wie man sieht, sind die allermeisten Anwendungen auf eine einzelne Art, also zum Beispiel Hand oder Arm beschränkt. In der Teleoperationsanwendung findet man auch Exoskelette, die die Hand und **gleichzeitig** den Arm umfasst (e.g. Frisoli et al., 2005). Es gibt aber keine Anwendungen, die Arme und gleichzeitig Beine oder noch anspruchsvoller Arme, Beine und Hände gleichzeitig umfassen.

Die Kombination von diesen Arten birgt neue Schwierigkeiten, da bei einzelnen Anwendungen gewisse Freiheitsgrade der Bewegung eingeschränkt werden können, ohne dabei die Anwendung zu behindern. Etwas vereinfacht darf man also sagen, dass je mehr Arten man kombiniert, desto höhere Ansprüche werden an das gesamte System gestellt und desto schwieriger ist es, dies geeignet umzusetzen. Dazu kommt, dass mit jedem zusätzlichen Element mehr Gewicht anfällt. Das heisst, die Anforderungen an das Eigengewicht und damit an die verwendeten Komponenten des Exoskeletts steigen stark an.

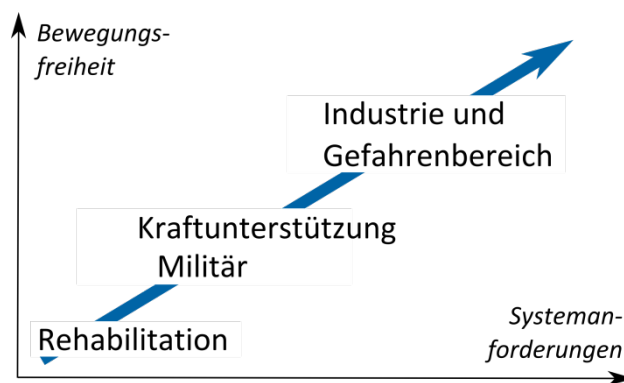


Abbildung 3: Qualitative Systemanforderung versus Bewegungsfreiheit für die verschiedenen Anwendungen.

Wie eingangs erwähnt, braucht die industrielle Anwendung eine flexible und breite Anwendungsbasis, damit Exoskelette interessant werden. Das bedeutet aber auch, dass wahrscheinlich nur ein komplettes Exoskelett diese Eigenschaft mit sich bringt. Diese Einschätzung ist in Abbildung 3 qualitativ dargestellt.

Will man mit Exoskeletten in die industrielle Anwendung vorstossen, so ergeben sich neue Herausforderungen an die Mensch-Roboter-Interaktion und visionäre Anforderungen an die Systemkomponenten und Systemregelung, die bis anhin nicht erreicht werden konnten. Die Anforderung in der industriellen Anwendung wird mit den Anforderungen in der Anwendung in Gefahrenbereichen vergleichbar sein.

### 3. Industrielle Anwendung von Exoskeletten

#### 3.1 Umfeld

Ideen zum Einsatz von Exoskeletten in der Industrie gibt es schon seit Jahrzehnten (Cloud, 1965), eine reale Anwendung, die sich über eine längere Zeit gehalten hat jedoch nicht. Neben der eingangs erwähnten Steigerung der Produktionseffizienz ohne Verlust von Produktionsflexibilität könnten Exoskelette andere interessante Beiträge leisten. Ein nicht unerheblicher wirtschaftlicher Faktor sind die gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Verletzungen von Mitarbeitern, die durch Heben und Tragen von schweren und unförmigen Gegenständen entstehen. Das Verhindern von Ausfällen ist also ein wirtschaftlicher Anreiz für die Industrie. Die Automobilindustrie ist typischerweise führend in der Arbeitnehmersicherheit. Dazu kommt, dass diese einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweist und daher eine Affinität gegenüber Robotern vorweisen kann. Zum Beispiel hat Honda ein Exoskelett getestet, das das Körpergewicht stützt, sodass auch eine hockende Position leicht angenommen werden kann (*Freedom of Motion - Walking Assist Device with Bodyweight Support Assist*, 2008). Andere zielen auf wenig bis gar nicht automatisierte „Produktionsprozesse“ ab, wie zum Beispiel das Baugewerbe (Yu et al., 2008), da der Einsatz eines Exoskeletts einen sehr grossen Einfluss auf die Effizienzsteigerung haben könnte und grundsätzlich wenige Alternativen zur Verfügung stehen.

Die möglichen industriellen Anwendungen gehen wesentlich weiter als die Anwendungen in den medizinischen und militärischen Bereichen. Es ist von vornherein klar, dass ein Paraplegiker ein Exoskelett in seinem Umfeld anwenden würde. Das heisst in Räumen mit wahrscheinlich wenigen Hindernissen und grosszügigem Raumangebot. In der Industrie möchte man Exoskeletts gerade an schwer zugänglichen und engen Räumen und in unnatürlichen Positionen anwenden. Man nehme an, in der Automobilindustrie soll ein Mitarbeiter unterstützt durch ein Exoskelett einen Sitz in ein neues Auto einsetzen. Es ist unweigerlich, dass der Mitarbeiter mit dem Sitz zirkeln muss, damit er diesen durch die Türe einsetzen kann. Die Haltung des Mitarbeiters wird sehr unnatürlich sein, da der Sitz weit vom Körper gehalten werden muss und weder Mitarbeiter noch Sitz am Auto anstossen darf. Dies wirft sofort auch die Frage auf, wie die auftretenden Kräfte abgeleitet werden, sodass der Mitarbeiter stets geschützt ist. Ein Exoskelett wird in dieser Situation eher hinderlich sein, da man als Mitarbeiter durch das Exoskelett auch an Volumen zulegt. Es ist klar, dass man in der Automobilindustrie, eine andere Lösung bevorzugen würde. Es geht darum aufzuzeigen, welche Anwendungen respektive Produktionsschritte geeignet und welche ungeeignet sind. Dazu muss auch die Bedienerfreundlichkeit berücksichtigt werden. Man muss bedenken, dass das Exoskelett entweder von einem Mitarbeiter während einer ganzen Schicht getragen werden könnte, oder dieses in wenigen Minuten abgelegt und wieder angezogen werden müsste. Eine an sich simple (aber herausfordernde) Anforderung, die bei keinem der anderen Anwendungen erfüllt ist. Eine andere mögliche Anwendung könnte das Stapeln von Paketsendungen sein. Mitarbeiter von Versandfirmen stapeln und sortieren Sendungen von unterschiedlicher Grösse und Gewicht. Um diese Arbeit zu erleichtern und damit eine effizientere, ausdauernde und sicherere Ausnutzung der menschlichen Ressource zu gewähren, könnte ein Exoskelett zum Einsatz kommen. Typischerweise ist diese Arbeit auch auf einen begrenzten Raum beschränkt. Das erleichtert die Versorgung des Systems mit elektrischer Energie und kann auch als mögliche Kraftableitung dienen, indem das Exoskelett wie eine Marionette aufgehängt wird.

Ein weiterer Beitrag wäre die Erweiterung des Exoskeletts durch „augmented reality“, dadurch könnten Produktionsschritte dem Mitarbeiter eingeblendet oder angezeigt werden. Dies würde den Ablauf wesentlich effizienter gestalten.

### 3.2 Industrielle Herausforderungen

Zusammengefasst sind typische Herausforderungen in einem industriellen Umfeld:

- Die Art des Exosketts ist nicht auf einen einzelnen Körperteil beschränkt.
- Der Mitarbeiter muss von gefährlichen Bewegungen geschützt werden und entstehende Kräfte dürfen nicht am Mitarbeiter wirken.
- Die Bedienerfreundlichkeit des Exosketts muss entweder einen Dauereinsatz oder schnelle Wechsel ermöglichen.
- Möglichst vielfältige Arbeiten müssen damit ausgeführt werden können.
- Bewegungsabläufe dürfen nicht beschränkt sein und das Exoskelett darf die Arbeiten nicht behindern.

Diese Herausforderungen manifestieren sich in technischen Anforderungen. Zum Beispiel wird die Wahl der Antriebstechnologie (hydraulisch, pneumatisch, elektrisch) wesentlich davon abhängen, welches industrielle Umfeld man angehen will und welche Energiequellen an einem Arbeitsplatz vorhanden sind oder nicht.

Es ist bekannt, dass eine schlechte Ergonomie bei der Produktion mit Qualitätsproblemen beim Produkt korreliert (Almgren and Schaurig, 2012; Falck et al., 2010). Gerade an dieser Stelle könnte ein Exoskelett von Bedeutung sein, da die Ergonomie des Mitarbeiters durch den Einsatz eines Exosketts verändert wird. Eine Herausforderung kann damit auch sein, die

- Produktion ergonomischer zu gestalten.

Damit wird auch gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei Mitarbeitern vorgebeugt.

## 4. Robo-Mate Projekt

Das Siebte Rahmenprogramm der Europäischen Kommission<sup>3</sup> unterstützt das Robo-Mate Projekt an unserem Institut. Das Thema des Kommissionsaufrufs ist: *Neue hybride Produktionssysteme für zukünftige Fabrikationsumgebungen basiert auf interaktiver Mensch-Roboter-Kooperationen*. Das Ziel des Robo-Mate Projektes ist die Anwendung von leichten und tragbaren Exoskeletten in der Industrie. Dabei sollen insbesondere die manuellen Tätigkeiten von Fabrikarbeitern erleichtert werden.

### 4.1 Projektaufbau

Das Robo-Mate Konsortium besteht aus 12 verschiedenen Partnern aus 7 verschiedenen Europäischen Ländern. Es setzt sich aus akademischen und industriellen Forschungseinheiten, Systemlieferanten und Endnutzern zusammen (ROPARDO SRL, Sibiu, Rumänien; Centro Ricerche Fiat S.C.p.A., Orbassano, Italien; MRK-Systeme GmbH, Augsburg, Deutschland; Istituto Italiano di Tecnologia (IIT), Genova, Italien; Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V., München, Deutschland; University of Limerick, Irland; Dutch Organization for Applied Scientific Research (TNO), Delft, Niederlande; Accelopment AG, Zürich, Schweiz; INDRA SAS, Vaulx-Mileu, Frankreich; COMPA SA, Sibiu, Rumänien; Güdel AG, Langenthal, Schweiz; Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, Schweiz). Die Dauer ist auf drei Jahre festgelegt. Dabei soll ein Exoskelett entwickelt werden und dieses bei einem Endnutzer eingesetzt werden.

### 4.2 Mögliche Anwendungen

Als mögliche Anwendung zeichnet sich ein Einsatz in der Automobildemontage ab. Die Demontage und das anschließende Rezyklieren von Rohstoffen und Wiederverwenden von Teilen werden stark gefördert. Bis 2015 muss in der EU 95% des Gewichtes eines Autos rezykliert oder wiederverwendet werden (RICHTLINIE 2000/53/EG, 2000). Da im Gegensatz zur Montage keine einheitlichen Automobile zur Demontage gelangen, muss diese von Auto zu Auto neu angepasst werden. Deshalb sind nur wenige Schritte während des Demontageprozesses automatisiert, während der Grossteil der Tätigkeiten manuell durch die Fabrikarbeiter ausgeführt wird. Normalerweise werden zuerst die Teile entfernt, die direkt als Ersatzteile wiederverkauft werden können. Je nach Marktsituation für ein bestimmtes Auto sind andere Elemente von Interesse. Erst danach wird mit wenig Rücksicht die restliche Demontage fortgesetzt, um die Rohstoffe (Eisen, Kupfer, ...) zurückzugewinnen. Der Demontageprozess wird also kontinuierlich angepasst. Es ist daher unumgänglich, dass ein Exoskelett sehr flexibel eingesetzt werden muss, damit dieses die erhofften Erleichterungen für die Fabrikarbeiter erzielen kann.

### 4.3 Konzeptideen

Die offenen industriellen Herausforderungen sind extrem umfangreich und anspruchsvoll. Deshalb ist es wesentlich, sich zuerst auf einige wenige Tätigkeiten zu konzentrieren und dann die Anwendbarkeit des Exoskeletts zu erweitern. Die Ausprägung des Exoskeletts hängt also sehr stark von den zu definierenden Tätigkeiten ab (z.B. maximale Last).

In Abbildung 4 ist ein mögliches Konzept dargestellt. Neben der eigentlichen Unterstützung der manuellen Arbeit, sind auch futuristische Ansätze bezüglich Informationsaufbereitung vorgesehen. Gerade weil Exoskelette nicht nur für den Benutzer eine Gefahr darstellen können, sondern auch für jene Mitarbeiter, die in der Nähe sind, muss entsprechende Information zur Umgebung dem Bediener mitgeteilt werden. Es sind aber auch Hilfen wie die Darstellung des nächsten Handgriffs oder Produktionsschrittes vorgesehen.

<sup>3</sup> [http://cordis.europa.eu/fp7/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html)

Ein offenes Problem stellen die auftretenden Kräfte und deren Ableitung dar. Der Bediener darf nie erhöhten Kräften ausgesetzt werden, daher müssen diese durch entsprechende Massnahmen aufgefangen werden. Eine kleine Auflagefläche (wie eine zweite Sohle bei der militärischen Anwendung) wird nicht genügend sein, da durch die Hebelwirkung beim Platzieren von schweren Objekten schnell grosse Momente entstehen, die das Mensch-Roboter-System aus dem Gleichgewicht bringen könnte.

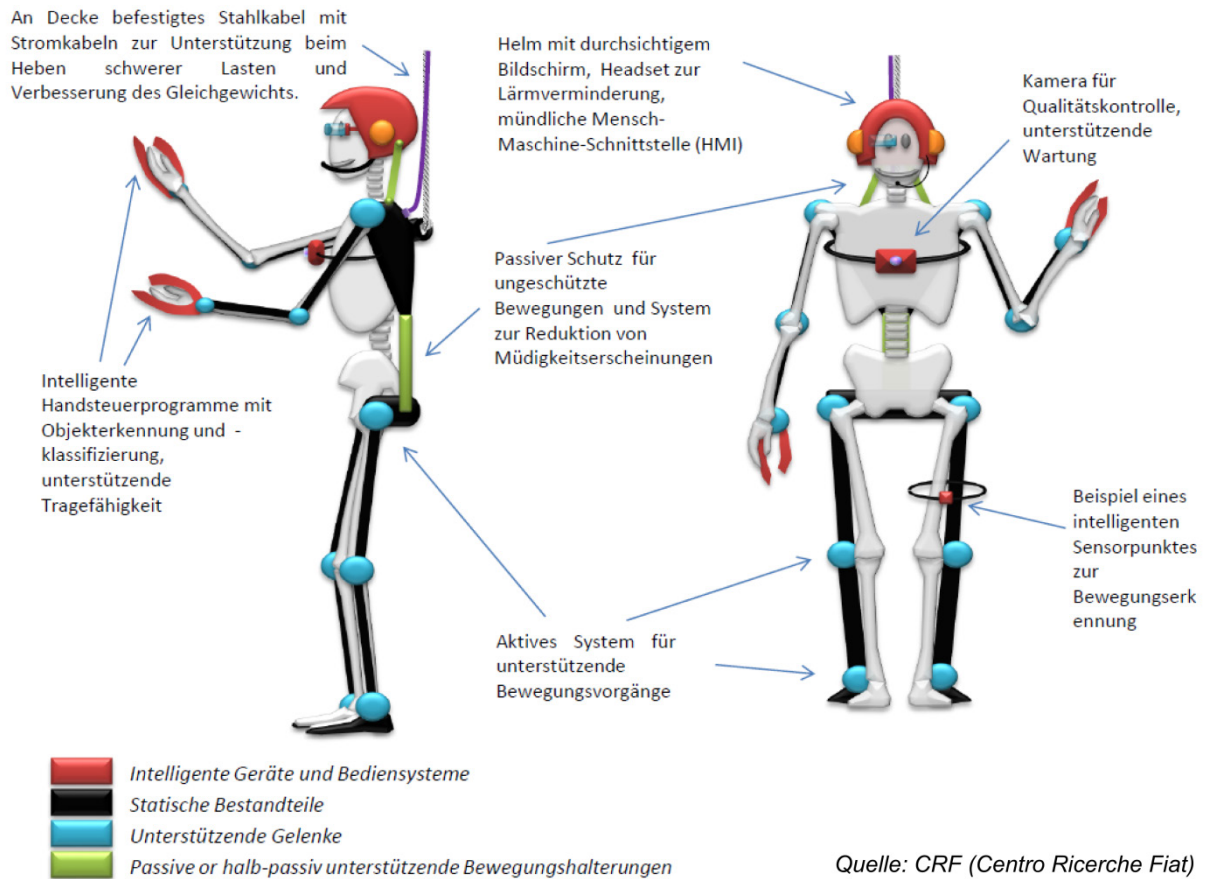


Abbildung 4: Robo-Mate Konzept (mit freundlicher Genehmigung von Centro Ricerche Fiat S.C.p.A., Orbassano, Italy)

## 5. Fazit

Gerade die Film-Produktionen aus Hollywood lassen den Eindruck entstehen, dass solche Systeme existieren und versatil einsetzbar sind. Dies ist nicht der Fall. Die wenigen realen Anwendungen konzentrieren sich auf medizinische und militärische Bereiche. Beide haben klar definierte Bewegungsabläufe vorgegeben und beschränken sich auf die Mobilisierung eines Körperabschnittes. Die industrielle Anwendung hingegen verlangt eine sehr breite Einsetzbarkeit, um eine flexible und effiziente Produktion zu garantieren. Dies ist in diesem Ausmass noch niemandem gelungen.

Um Exoskelette in der industriellen Produktion einsetzen zu können, müssen die Anforderungen sehr genau bekannt sein. Ziel ist es, bestimmte Bewegungsabläufe zu unterstützen, dabei muss aber auch auf die Anwendbarkeit ein besonderes Augenmerk gerichtet werden. Im Gegensatz zu den üblichen Anwendungsgebieten muss die Handhabung ohne Hilfe von Dritten gewährleistet werden können. Ein An- und Abziehen muss einfach und schnell geschehen können. Das Exoskelett darf in engen Verhältnissen die Bewegungsfreiheit des Bedieners nicht einschränken oder behindern.

Die Herausforderungen für die Forschung und Entwicklung sind immens und visionär. Nur schon die Kombination von Hand, Arm und Bein Exoskeletten ist eine absolut neuartige Technologie, die höchste Anforderungen an die Interaktion der Komponenten sowie an die Gewichts- und Grössenansprüche stellt. Durch die Möglichkeit in einem breit abgestützten, erfahrenen und kompetenten Konsortium zusammenzuarbeiten haben wir die Chance, die nächste wirkliche Innovation für die flexible und effiziente Produktion für die Zukunft zu schaffen.

## Literatur

- Almgren, J., Schaurig, C., 2012. The influence of production ergonomics on product quality (Master of Science Thesis). Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Anisi, D.A., Skourup, C., 2012. A step-wise approach to oil and gas robotics\*, in: Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production. International Federation of Automatic Control, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Banala, S.K., Seok Hun Kim, Agrawal, S.K., Scholz, J.P., 2009. Robot Assisted Gait Training With Active Leg Exoskeleton (ALEX). IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 17, 2–8.
- Bergamasco, M., Allotta, B., Bosio, L., Ferretti, L., Parrini, G., Prisco, G.M., Salsedo, F., Sartini, G., 1994. An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications, in: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1449–1454.
- Cloud, W., 1965. Man Amplifiers: Machines that Let You Carry a Ton. Popular Science 187, 70–73.
- Falck, A.-C., Örtengren, R., Högberg, D., 2010. The impact of poor assembly ergonomics on product quality: A cost-benefit analysis in car manufacturing. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 20, 24–41.
- Freedom of Motion - Walking Assist Device with Bodyweight Support Assist (Product Advertisement), 2008. . Honda Motor Company.
- Frisoli, A., Rocchi, F., Marcheschi, S., Dettori, A., Salsedo, F., Bergamasco, M., 2005. A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments, in: Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and World Haptics Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. pp. 195–201.
- Gopura, R., Kiguchi, K., Bandara, D.S.V., 2011. A brief review on upper extremity robotic exoskeleton systems, in: Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). pp. 346–351.
- HULC® - Exoskeletons Enhance Mobility and Increase Endurance (Product Advertisement), 2012. . Lockheed Martin Corporation.
- Kazerooni, H., Racine, J.-L., Huang, L., Steger, R., 2005. On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), in: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 4353–4360.
- Kiguchi, K., Tanaka, T., Fukuda, T., 2004. Neuro-Fuzzy Control of a Robotic Exoskeleton With EMG Signals. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 12, 481–490.
- Lee, S., Lee, J., Choi, D.-S., Kim, M., Lee, C.-W., 1999. The distributed controller architecture for a master arm and its application to teleoperation with force feedback, in: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 213–218.
- Low, K.H., Liu, X., Yu, H., 2005. Development of NTU wearable exoskeleton system for assistive technologies, in: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference Mechatronics and Automation. pp. 1099–1106.
- Lunenburger, L., Colombo, G., Riener, R., Dietz, V., 2005. Clinical assessments performed during robotic rehabilitation by the gait training robot Lokomat, in: Proceedings of the 9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). pp. 345–348.

- Mertz, L., 2012. The Next Generation of Exoskeletons: Lighter, Cheaper Devices Are in the Works. *IEEE Pulse* 3, 56–61.
- Mulas, M., Folgheraiter, M., Gini, G., 2005. An EMG-controlled exoskeleton for hand rehabilitation, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. pp. 371–374.
- Nef, T., Mihelj, M., Kiefer, G., Perndl, C., Muller, R., Riener, R., 2007. ARMin-Exoskeleton for arm therapy in stroke patients, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. pp. 68–74.
- Nilsson, M., Ingvast, J., Wikander, J., von Holst, H., 2012. The Soft Extra Muscle system for improving the grasping capability in neurological rehabilitation, in: *Proceedings of the 2012 IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)*. pp. 412–417.
- Pratt, J.E., Krupp, B.T., Morse, C.J., Collins, S.H., 2004. The RoboKnee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking, in: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. pp. 2430–2435.
- RICHTLINIE 2000/53/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge, 2000.
- Riener, R., 2009. Neue Techniken in der Neurorehabilitation, in: *Medizintechnik*. Springer, pp. 1807–1831.
- Ruiz, A.F., Forner-Cordero, A., Rocon, E., Pons, J.L., 2006. Exoskeletons for rehabilitation and motor control, in: *Proceedings of the the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*. pp. 601–606.
- Strickland, E., 2012. Good-bye, Wheelchair This year an exoskeleton for paraplegics hits the market. *IEEE Spectrum* 30–32.
- Umetani, Y., Yamada, Y., Morizono, T., Yoshida, T., Aoki, S., 1999. “Skil Mate” wearable exoskeleton robot, in: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. pp. 984–988.
- Walsh, C.J., Paluska, D., Pasch, K., Grand, W., Valiente, A., Herr, H., 2006. Development of a lightweight, under-actuated exoskeleton for load-carrying augmentation, in: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. pp. 3485–3491.
- Yu, S., Lee, S., Lee, H., Han, C., 2008. Design and Feasibility Verification of a Knee Assistive Exoskeleton System for Construction Workers, in: *Robotics and Automation in Construction*. InTech.