

BMBF-Verbundprojekte PortaSOR und KoBSAR: Systemtechnische Lösungen mit elastisch nachgie- bigen Gelenken für benutzer-kooperierende Roboter und medizintechnische Geräte

O. Ivlev¹, A. Schöne²

FWBI Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft mbH, Bremen

Kurzfassung

Die BMBF-Verbundprojekte PortaSOR und KoBSAR verfolgen eine neue gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsrichtung in der Roboter- und Medizintechnik, die auf Vorarbeiten in einem vom Bundesminister für Wirtschaft in den Jahren 2003 bis 2006 unter dem Dach der AiF geförderten Forschungsvorhaben ZUTECH ZN 113 „Hochinnovatives Baukastensystem für gelenkige Leichtbauroboter mit flexiblen Servo-Fluidaktoren“ aufgebaut wird. In diesem Vorhaben waren neuartige, fluidisch angetriebene Aktoren in Gestalt einer besonderen Klasse von „Soft-Antrieben“ mit speziellen elastischen, segmentförmig ausdehnbaren Arbeitskammern erforscht und in Form von Labormustern realisiert worden. Im Unterschied zu bekannten linearen „fluidischen Muskeln“ wird bei diesen Soft-Antrieben unmittelbar eine Drehbewegung erzeugt. Die mechanische Konstruktion von mehrachsigen Robotern wird erheblich vereinfacht, da keine zusätzlichen Transmissionselemente benötigt werden. Dank innewohnender Nachgiebigkeit der Antriebe kann recht problemlos eine direkte Interaktion mit Menschen realisiert werden, und zwar ohne aufwendige Reglerstrukturen und kostspielige konstruktive Vorkehrungen.

Auf diesem technischen Wege wird im Forschungsvorhaben PortaSOR eine neue Generation von portablen „sanften“ Roboterarmen und Greifern mit innewohnender Elastizität für vielseitige Anwendungen erforscht und weiterentwickelt. Erforderlich sind hierfür die Erforschung neuer Technologien und Herstellungsmethoden in den Bereichen Verfahrenstechnik und Verbundwerkstoffe sowie die Erforschung systemtechnischer Lösungen für eine exakte Regelung von Robotern mit elastischen Antriebselementen und kompressiblen Arbeitsmedien.

Auf entsprechender technischer Basis soll im Forschungsvorhaben KoBSAR eine Klasse gleichfalls neuartiger assistiv-kooperierender Bewegungstherapie-Geräte, also Geräte der Medizintechnik, erforscht, entwickelt und klinisch getestet werden. Durch die Eigenschaft der innewohnenden Nachgiebigkeit wird eine „passive“ Interaktion zwischen dem Gerät und dem Patienten ermöglicht. Das umrissene technische Vorgehen macht es möglich, auf recht unkomplizierten Wege auch „aktive“ Interaktionen und somit assistive Bewegungsabläufe zu implementieren. Dadurch werden die Grundlagen für eine fortgeschrittene Rehabilitationstherapie geschaffen.

¹ Dr. Oleg Ivlev, FWBI Forschungsgesellschaft mbH, Bremen, E-Mail: ivlev@dfmrs.de

² Prof. Dr.-Ing. Armin Schöne, FWBI Forschungsgesellschaft mbH und Universität Bremen, E-Mail: ajs@dfmrs.de

Nach dem Urteil der beteiligten Ärzte sind die medizinischen Indikationen vielfältig, die Anzahl der betroffenen Patienten ist groß. Daher wird mit guten Marktchancen für diese innovativen medizintechnischen Geräte und zugleich mit erheblichen Fortschritten bei der Rehabilitation gerechnet.

1 Einleitung

1.1 Problembeschreibung und Ausgangssituation

In der Service- und Assistenzrobotik, die die Bereiche von Industrie und Haushalt über Medizin- und Rehabilitationsrobotik bis zur Spielzeugtechnik umfasst, stehen Sicherheitsanforderungen im Vordergrund. Eine immanente, jedoch exakt regulierbare Nachgiebigkeit und daraus folgende grundsätzliche Manipulationssicherheit sind dabei von unerlässlicher Bedeutung. Bereits seit mehreren Jahrzehnten sind geschickte, leichte und präzise Manipulatoren Gegenstand von intensiven Untersuchungen und Entwicklungen. Stellvertretend für beeindruckende Erfolge im mechatronischen Leichtbau steht der DLR-Leichtbauroboter [1]. Bei diesem handelt es sich um das erfolgreichste Beispiel der Realisierung eines Leichtbauroboterarmes mit elektromechanischen Gelenken. In jedem Gelenk ist ein Drehmomentsensor integriert, so dass durch geschickte und sehr komplexe Regelung sowohl jedes Gelenk als auch der gesamte Arm beim geschlossenen Regelkreis eine gewisse Nachgiebigkeit aufweisen kann. Außerhalb der Regler-Bandbreite, genauso wie bei Störungen in Kraft/Momentrückkopplungen, verliert der Arm seine Nachgiebigkeit.

Deswegen wird weiter nach neuen Konzepten für sichere und nach Möglichkeit nicht so aufwendigen Manipulatoren gesucht, die auch im unmittelbaren Kontakt mit Menschen zuverlässig arbeiten können [2]. Der nahe liegende Weg zur Erreichung einer garantierten mechanischen Manipulationssicherheit durch Einführung passiver elastischer Elemente (Federn) in der Gelenktransmission [3] führt erwartungsgemäß zur Begrenzung der Tragfähigkeit des Manipulators. Mit den neuesten Konzepten wie z.B. *distributed macro-mini actuation* [4] oder *variable stiffnes actuation* [5] wird versucht, diese Nachteile zu mindern, indem komplizierte mechanische Transmissionen, teilweise mit Elastizität, zum Einsatz kommen.

Eine Alternative zu elektromechanischen Gelenken stellen Roboter-Antriebskonzepte dar, die auf den so genannten „pneumatischen Muskeln“ (PM) basieren. Derartige fluidisch angetriebene Aktoren mit natürlicher Elastizität sind für Service- und Assistenzbereiche prädestiniert und werden weltweit intensiv erforscht [6 - 11]. Das Ar-

beitsprinzip pneumatischer Muskeln ist dem biologischen Vorbild nachempfunden und basiert auf dem Effekt der gleichzeitigen axialen Kontraktion und radialen Extraktion eines geschlossenen Schlauchstückes mit polymorpher Wandstruktur bei Erhöhung des Innendruckes. Eine Vielfalt von unterschiedlichen Typen solcher Zug-Aktoren wurde entwickelt, um den oben erwähnten Effekt zu verstärken; eine Übersicht dieser Arbeiten ist in [12] zu finden.

Seit einiger Zeit hat die FESTO AG & Co. KG aus Esslingen den bekanntesten Typ dieser fluidischen Aktoren, so genannte McKibben-Muskel [13], technologisch perfektioniert und unter dem Produktnamen *fluidic muscle MAS* auf den Markt gebracht [14]. Der Anwendungsbereich erstreckt sich weit über die Robotik hinaus in die industrielle Prozessautomatisierung, wo sich die Anwendungen hauptsächlich auf einachsige Linear- und/oder Drehbewegungen beschränken. Beispiele von Realisierungen komplexerer kinematischer Strukturen auf der Basis von *fluidic muscle MAS* sind ein 6-DOF Roboterarm [10] oder eine Laufmaschine mit sechs Beinen [15].

Auf dem gleichen Muskel-Typ (McKibben-Muskel) basiert eine andere zur Zeit kommerziell verfügbare Variante – *air muscle* von „The Shadow Robot Company“, London, der als Antrieb bei vielen beeindruckenden aber auch mechanisch sehr anspruchsvollen Entwicklungen, wie *The Shadow Dexterous Hand*, *Biomorphic Arm* oder *Shadow Biped* dient [16].

Interessante Alternativen zu den herkömmlichen pneumatischen Muskeln vom McKibben-Typ stellen die so genannten *pleated pneumatic muscle* [17], entwickelt bei Vrije Universiteit Brussels, Belgien, sowie die *pneumatic bellows* [18], entwickelt bei University of Michigan, USA, dar. Diese Entwicklungen zielen hauptsächlich darauf hin, das für McKibben-Muskeln typische stark nichtlineare und für viele Anwendungen nachteilige Kontraktionsverhalten (Zugkraftabfall bei der Aktuatorkontraktion) und somit die Kraft-Charakteristiken des Antriebes zu verbessern.

In der Medizintechnik (und speziell bei motorisierten Bewegungstherapie-Geräten, die als effektive technische Hilfen für die Unterstützung und Wiederherstellung der Gelenkfunktionen und motorischen Fähigkeiten nach einer breiten Palette von Erkrankungen und Funktionsstörungen dienen) spielt diese Eigenschaft – Zugkraftabfall am Ende des Bewegungsbereiches – eher eine positive Rolle, da dieses die Sicherheit bei der Anwendung zusätzlich erhöht. Außerdem besitzt dieser Antriebstyp

die für patientenkooperative (assistive) Bewegungsabläufe notwendige innere Elastizität. Eine regulierbare Nachgiebigkeit ist für diese Antriebe einfacher als für Elektromotoren realisierbar.

Derzeit werden in einer Reihe von Projekten in Japan und Südkorea Anwendungen von flexiblen fluidischen Antrieben in robotergestützten Therapien sowie die Möglichkeit der Kraft-Unterstützung des medizinischen Personals untersucht [19-21].

Das einzige Rehabilitationsgerät, das sich bisher auf dem Markt befindet und auf der pneumatischen Muskel-Technologie basiert, ist der *Hand Mentors* der Firma KMI aus Arizona, USA [22]. Das Gerät wurde in Zusammenarbeit mit der Arizona State University entwickelt und für die häusliche Rehabilitation der Hand konzipiert. Das gleiche Team arbeitet zurzeit an der Entwicklung von RUPERT – *Robotic Upper Extremity Repetitive Therapy* [23]. Als Aktuatoren werden insgesamt vier pneumatische Muskeln benutzt, die die Bewegungen der Schulter, des Ellbogens und des Handgelenks unterstützen (Bild 1a). Die neuesten Anwendungsbeispiele der pneumatischen Muskeln für die Rehabilitation der unteren Extremitäten, wie z.B. der so genannten *Powered Ankle-Foot Orthoses* (Bild 1b), sind in [24, 25] zu finden.

Ein zweiachsiger Roboter auf der Basis von pneumatischen Muskeln, der anfangs der 90-er Jahre von der Firma Bridgestone kommerziell produziert wurde, ist als Basis für die Entwicklung eines exoskelettartigen Rehabilitations-Roboterarms benutzt worden [26]. Ein Exoskelett mit sieben Freiheitsgraden wurde vor kurzem ebenfalls mit pneumatischen Muskeln entwickelt, das als Mehrzweckgerät sowohl für die Therapie als auch für Trainingzwecke der oberen Extremitäten dienen soll [27]. Diese Entwicklung zeigt einerseits die Vorteile der Anwendung von fluidischen Muskeln in der robotergestützten Therapie: immanente Sicherheit, Leichtbau (das Exoskelett wiegt nur ca. 2 kg), natürliche Nachgiebigkeit und niedrige Produktionskosten; andererseits ist die mechanische Ausführung von rotatorischen Robotergelenken mit linearen Antrieben sehr kompliziert (Bild 1c).

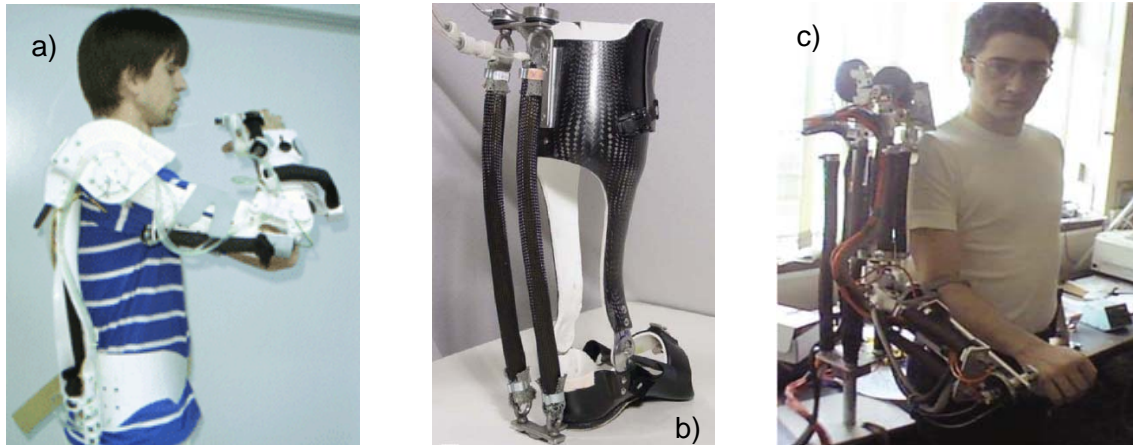


Bild 1. Rehabilitationsgeräte auf der Basis von pneumatischen Muskeln:

(a) RUPERT [23]; (b) Powered ankle-foot orthoses [24]; (c) 7-achsiges Exoskelett [27].

Trotz dieser weit gefächerten Forschungsaktivitäten fehlen in der heutigen gerätegestützten Rehabilitation kompakte und kostengünstige Bewegungstherapie-Geräte, die mit den Patienten assistiv kooperieren, sowohl für die oberen als auch für die unteren Extremitäten konzipiert und einfach zu bedienen sind, und nach Möglichkeit nicht nur für klinische, sondern auch für häusliche Anwendungen geeignet sind. Ebenso fehlen auf dem Markt die speziell für Assistenz- und Serviceaufgaben in Alltagsumgebung konzipierten Roboterarme, die hinreichend leicht, geschickt und präzise genug für die direkte Interaktion mit Menschen sind.

1.2 Eigene Vorarbeiten

Die technische Basis für die BMBF-Forschungsvorhaben PortaSOR und KoBSAR bilden die neuartigen fluidischen Gelenkantriebe für Leichtbauroboter, die vom FWBI in Kooperation mit dem Forschungszentrum Karlsruhe und Universität Bremen u.a. im Rahmen des von der DFMRS beantragten, vom BMWA geförderten und bereits abgeschlossenen ZUTECH-Projektes ZN 113 erforscht worden sind [28, 29]. Diese Gelenkantriebe enthalten spezielle elastisch nachgiebige Kraftelemente – eine besondere Art von fluidischen Aktuatoren (Bild 2), die im Unterschied zu herkömmlichen linear-wirkenden pneumatischen Muskeln unmittelbar Drehbewegungen erzeugen.

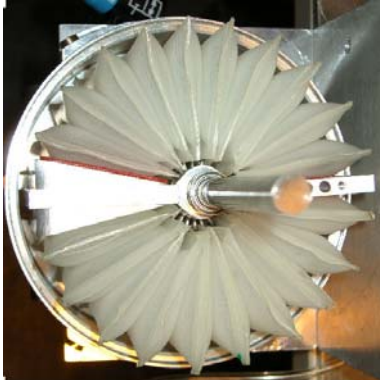


Bild 2: Fluidischer Drehantrieb mit elastischen Rotationsarbeitskammern



Bild 3: Leichtbau-Roboterarmgelenkmodul in hydraulischer Ausführung

Die Leichtbaugelenkmodule (Bild 3) weisen eine hohe Leistungsdichte (Drehmoment bis zu 40 Nm, Eigengewicht 500g in pneumatischer, 900g in hydraulischer Ausführung) auf und können ungeachtet ihrer Nachgiebigkeit exakt, mit einer Genauigkeit von $0,05^\circ$, geregelt werden [30]. Auf dieser technologischen Basis aufgebaute Leichtbauroboterarme (Bild 4) besitzen eine naturimmanente Nachgiebigkeit [31], wie sie für gefahrlose Manipulationen in Alltagsumgebungen zwingend erforderlich ist. Um derartige passive Nachgiebigkeit bei elektromechanisch angetriebenen Roboterarmen zu erreichen, sind spezielle, teilweise sehr kostspielige und teilweise sehr komplizierte Gestaltungen des konstruktiven Aufbaus erforderlich.



Bild 4: Leichtbau-Roboterarm mit nachgiebigen fluidischen Gelenkantrieben

2 Projektziele und Lösungswege

2.1 Verbundprojekt PortaSOR

Dieses Verbundprojekt mit dem ausführlichen Titel *Neue Generation von portablen Soft-Roboterarmen mit „sanften“ Greifern auf Basis von elastischen fluidischen Gelenken für alltägliche Assistenz- und Serviceaufgaben* hat das Gesamtziel, nach den

notwendigen theoretischen und experimentellen Voruntersuchungen funktionsfähige Versuchsmuster (Demonstratoren) von portablen anwendungssicheren Roboterarmen und Greifern in extremer Leichtbauweise zu entwickeln und zu realisieren. Als Vorbereitung für den Aufbau dieser Demonstratoren sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf unterschiedlichen Forschungsgebieten erforderlich. Im einzelnen haben diese folgende wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele:

- Erforschung und Entwicklung neuartiger fluidischer Drehantriebe mit elastischen Krafterelementen. Neben den Kernfragen, die mit konstruktiver Auslegung und Herstellungstechnologien von elastischen Krafterelementen verbunden sind, müssen hierbei auch Fragen der problembezogenen Auslegung der notwendigen Komponenten des fluidischen Netzwerkes (Miniaturventile, Druckmedierversorgungseinheiten, flexible oder gelenkige Durchführungselemente für den Transport des Fluids usw.) untersucht und ggf. einschlägige Sonderentwicklungen durchgeführt werden;

- Konzipierung, Spezifikation und Design einer Baureihe von portablen „sanften“ fluidischen Roboterarmen und Greifern (Hände) unter Implementierung der oben genannten Drehantriebe für unterschiedliche Anwendungen auf dem Gebiet der Assistenz- und Servicerobotik hinsichtlich Kinematik, Genauigkeit, Handhabung, Portabilität, äußerer Gestaltung und Erfüllung der Sicherheitsanforderungen

- Methoden und Verfahren zur robusten adaptiven Regelung und Steuerung sowohl der einzelnen neuartigen Gelenkantriebe mit stark nichtlinearen dynamischen Charakteristiken als auch des gesamten nachgiebigen Roboterarmes unter Berücksichtigung der antriebsspezifischen Gelenkdynamik und Sicherheitsaspekten.

Bei der Entwicklung von Roboterarmen mit Greifern wird das Baukastenprinzip verfolgt.

2.2 Verbundprojekt KoBSAR

Das Ziel dieses Verbundprojektes mit dem Titel *Kompakte assistiv-restaurative Bewegungstherapie-Geräte neuer Generation auf Basis fluidischer Soft-Antriebe mit elastischen Rotationsarbeitskammern* sind effektive und preiswerte patientenkooperierende Bewegungstrainer sowie die Implementierung neuer Behandlungsmethoden sowohl für den klinischen Einsatz unter Aufsicht von Ärzten und Pfleger wie auch für den häuslichen Einsatz. Entscheidende Merkmale dieser Bewegungstherapie-Geräte sollen sein:

- Anstelle der traditionellen starren elektronischen Antriebe der Bewegungstherapie-Geräte sollen nachgiebige rotatorische fluidische Gelenkmodulen mit beliebig einstellbaren Kraftwirkungen angepasst, entwickelt und eingesetzt werden. Diese Gelenkmodule erzeugen recht hohe, und jedenfalls für die Bewegungstherapie völlig ausreichende Kräfte, geben jedoch nach, wenn solche Kräfte eine bestimmte obere Grenze übersteigen. Die Nachgiebigkeit ist ein inhärentes Merkmal des konstruktiven Aufbaus. Sie muss also nicht mittels besonderer Sensoren und Regeleinrichtungen realisiert werden. Diese Gelenkmodule haben gegenüber dem gegenwärtig für ähnliche Anwendungen untersuchten „pneumatischen Muskeln“ einen fundamentalen ingenieurtechnischen Vorteil: die Gelenkmodule erzeugen unmittelbar die Drehbewegungen, die in einem Bewegungstherapie-Gerät den Extremitätsbewegungen entsprechen.

- Durch geeignete Sensorik sollen der Kräftezustand des Patienten und dessen Befinden fortlaufend erfasst und in Abhängigkeit davon und auch in Abhängigkeit von gestuften Handbetätigungen durch den Arzt, Therapeuten oder auch durch den Patienten der Übergang passiv – aktiv in beiden Richtungen fortlaufend geregelt und gesteuert werden.

- Die genannten Einrichtungen werden mit halb- und vollautomatischen Datenerfassungs- und Dokumentiereinrichtungen verbunden, welche die Aufgabe haben, die Einstellungen der Bewegungstherapie und die zugehörigen Sensordaten, die Aufschluss über den Therapieablauf geben, fortlaufend zu erfassen.

Aus Kostengründen und um das System für verschiedene Gelenke verwenden zu können, ist beabsichtigt, Bewegungsschienen nach dem Baukastenprinzip zu erstellen, z.B. Schulter-Ellenbogenschienen oder Knie-Hüft-Schienen.

3 Projektorganisation und systemtechnische Lösungen

3.1 Verbundprojekt PortaSOR

Die in diesem Verbundprojekt geplanten FuE-Arbeiten sind in fünf Arbeitsblocks gegliedert, die aus einzelnen Arbeitspaketen (AP) bestehen:

1. Gelenkantriebe und Antriebskomponenten

1.1 Elastische Kraftelemente – Aspekt der Materialforschung und Fertigungstechnologien

- 1.2 Elastische Kraftelemente – Berechnungsgrundlagen,
Simulation und Experimente
 - 1.3 Gelenkmechanik – Optimierung der Leichtbaukonstruktion
 - 1.4 Fertigungs- und Produktionstechnologien
der mechanischen Aufbau (Feinmechanik)
 - 1.5 Gelenkmechanik – Bearbeitungstechnologien
von (faserverstärkten) Leichtbau-Werkstoffen
 - 1.6 Mechatronische Lösungen – integrierte Sensorik und Auswertelektronik
 - 1.7 Fluidisches Netzwerk – Konzepte und Entwicklung integrierter Komponenten
 - 1.8 Portable Druckmedierversorgungseinheiten – Auswahl
und Weiterentwicklung
2. Roboterarm- und Roboterhand-Design
- 2.1 Analyse und Auswertung von Designeigenschaften
bezogen auf Druckmedien
 - 2.2 Kinematische Gestaltung von Roboterarmen
 - 2.3 Entwicklung der Verbindungsglieder – Konstruktion, Materialauswahl
und Machbarkeitsanalyse
 - 2.4 Leckagenfreier Druckmedientransport durch Knick- und Dreh-Gelenke –
Entwicklungskonzepte und technische Lösungen
 - 2.5 Kinematischer Aufbau von Robotergreifern (mit zwei bis fünf Fingern)
 - 2.6 Sensorkonzepte für Robotergreifern
 - 2.7 Entwicklung der Greiferkonstruktion und Erforschung
von Fertigungstechnologien
3. Roboterdynamik und Regelung
- 3.1 Gelenkdynamik - Modellbildung und experimentelle Untersuchungen
 - 3.2 Lokale Regelung – Auslegung und Experimente
 - 3.3 Dynamik des Roboterarmes – Simulation und Verifikation
4. Controller- und Softwareentwicklung
- 4.1 Übergeordnete Robotersteuerung – Konzept und Simulationstests
 - 4.2 Programmierung einer modularisierten Bedieneroberfläche
5. Systemintegration und Funktionalitätsnachweis.
- 5.1 Machbarkeit- sowie Marktanalyse, Vermarktungsstrategien
 - 5.2 Technikdokumentation der Roboter-Demonstratoren
 - 5.3 Systemkomponenten für Versuchsmuster und Demonstratoren
 - 5.4 Aufbau von Demonstratoren und Funktionalitätstests

Das Konsortium des Verbundvorhabens PortaSOR setzt sich aus sechs Projektpartnern - zwei Forschungseinrichtungen und vier Industriepartner - zusammen:

- FWBI Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft m.b.H., Bremen (Verbundkoordinator);
- Institut für Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik (AIA) der Universität Karlsruhe (TH)
- i-sys Automationstechnik GmbH, Karlsruhe
- Dr. Winkler GmbH & Co. Herstellungs- und Vertrieb KG, Ainring-Mitterfelden
- Gottlob Dietz GmbH Elastomerteile, Neuenstadt
- Fluidmotion GmbH, Leipzig (assoziiert)

Die einzelnen Arbeitspakete werden von jeweils einem oder auch von mehreren Projektpartnern bearbeitet. Die von jedem Projektpartner insgesamt bearbeiteten Aufgaben bzw. ganze Arbeitspakete bilden jeweils ein Teilvorhaben.

Das Teilvorhaben DYNREG *Dynamik und Regelung von portablen Soft-Roboterarmen mit nachgiebigen fluidischen Gelenken* wird vom Projektkoordinator FWBI bearbeitet. Neben der Projektkoordination übernimmt die FWBI-Forschungsgesellschaft in dem Verbundprojekt folgende Aufgaben:

- Optimierung der kinematischen Struktur der Roboterbaureihe, inverse Kinematik;
- Roboterdynamik und Regelungsalgorithmen;
- Robotercontroller-Architektur und -Programmierung.

Das Teilvorhaben FLUGEL *Fluidische Gelenkantriebe mit elastischen Membrankammern für Soft-Roboterarme mit „sanften“ Greifer*, wird vom Projektpartner AIA der Universität Karlsruhe bearbeitet und befasst sich mit folgenden Themen:

- Entwicklung fluidischer Antriebe mit elastischen Krafterelementen und deren Berechnungsgrundlagen;
- Untersuchungen geeigneter Herstellungstechnologien der Antriebs- und Gelenkkomponenten;
- Konstruktive Integration der Antriebselemente und Sensoren in modulare Gelenksysteme;
- Entwicklung geeigneter Druckmedierversorgungs- und Steuerungseinheiten.

Das Teilvorhaben FEINMECH *Fertigungstechnologien für Feinmechanik-Präzisionskleinstteilen in Kombination mit Kunststoffkomponenten* wird vom Projektpartner i-sys GmbH bearbeitet; die Arbeitsinhalte sind:

- Entwicklung neuer Fertigungsprozesse für Kleinstteile in präziser Ausführung für die Roboter gelenk- sowie Roboterhandmechanik;
- Entwicklung geeigneter Fertigungstechnologien für die miniaturfluidischen Systemkomponenten, insbesondere der Ventiltechnik;
- Konstruktionsentwicklung und Konstruktionsanpassung hinsichtlich der zu verwendenden Fertigungstechnologien;
- Analyse der Verwendbarkeit und der Bearbeitungstechnologien von modernen Werkstoffen.

Die Entwicklungs- und Forschungsaufgaben, die der Projektpartner Dr. Winkler GmbH im Rahmen des Teilvorhabens *MEMBRAN Materialforschung und Herstellungstechnologien für elastische Membrankammern aus dünnen Gewebeverbundstoffen* übernommen hat, sind folgende:

- Entwicklung geeigneter Herstellungstechnologien bezüglich der Verbindung dünner Folienschichten und Verbundwerkstoffe in Kombination mit elastischen Volumenkörpern
- Forschung im Bereich der Wechselwirkungen von Form und Volumen der Aktorelemente und der damit zu erzielenden Kraftübertragungen
- Materialforschung, insbesondere flexible Verbundmaterialien bzw. gewebeverstärkte Kunststofffolien
- Untersuchung der technologischen Parameter hinsichtlich der Zug- und Belastungsfestigkeit.

Das Teilvorhaben *ELAST Material- und Technologieforschung zur Integration von Präzisionsteilen und Messelementen in elastomere Verbund-Materialien* wird vom Projektpartner Gottlob Dietz GmbH bearbeitet und umfasst folgende Aufgabenstellungen:

- Entwicklung neuer Herstellungstechniken bei der hart/weich- Materialkombination in flexiblen fluidischen Gelenkantrieben;
- Materialforschung zur Sensorenintegration in den Antriebselementen;
- Untersuchung der technologischen Parameter (Prozessparameter wie Temperatur, Druck, Vulkanisationszeit, Hafteigenschaft der Elastomere, Leitfähigkeit);
- Untersuchung des Verhaltens von Elastomeren und Hybridwerkstoffen gegen Umwelteinflüsse und Druckmedien.

Der assoziierte Projektpartner Fluidmotion GmbH wird im Rahmen des Teilvorhabens *PRODUKT Systemintegration und Vermarktungsstrategien* seine Erfahrung in der Systemintegration, in Fertigungsnetzwerken und in der Erarbeitung von Vermarktungsstrategien auf die im Projekt zu entwickelnden fluidischen Antriebselemente sowie deren Systembestandteile konzentrieren. Im Vordergrund werden jedoch die Entwicklung von koordinierten technischen Lösungen in einem Fertigungsnetzwerk sowie die Machbarkeitsanalyse der Systemkomponenten hinsichtlich späterer Vermarktung von kompletten fluidischen Leichtbau-Robotersystemen stehen.

Die nachstehende Tabelle gibt den Überblick über die Struktur und die Arbeitsteilung im Gesamtvorhaben sowie deutet die „Verzahnung“ der einzelnen Teilprojekten bzw. Projektpartner.

Tabelle 1: Organisationsdiagramm des Verbundprojektes PortaSOR

Verbundprojekt PORTASOR		Teilvorhaben					
		DYNREG	FLUGEL	PRODUKT	FEINMECH	MEMBRAN	ELAST
Arbeitsblöcke	1. Gelenkantriebe und Antriebskomponenten	AP 1.6	AP 1.2,1.3 1.6-1.8	AP 1.8	AP 1.1, 1.3, 1.4	AP 1.1, 1.6	AP 1.5, 1.6
	2. Roboterarm- und Roboterhand-Design	AP 2.2	AP 2.1, 2.3 -2.7		AP 2.7	AP 2.4, 2.7	AP 2.3, 2.4, 2.7
	3. Roboterdynamik und Regelung	AP 3.1 -3.3					
	4. Controller- und Softwareentwicklung	AP 4.1-4.2					
	5. Systemintegration und Funktionalitätsnachweis	AP 5.4	AP 5.4	AP 5.1, 5.2	AP 5.2-5.4	AP 5.2-5.4	AP 5.2-5.4

Der geplante Projektzeitraum erstreckt sich über 42 Monate mit Beginn am 01. August 2006 laut Bewilligungsbescheid. Die markierten Arbeitspakete werden zurzeit bearbeitet. Erste Versuchsmuster fluidischer Gelenke neuer Generation sind entwickelt, angefertigt und getestet. Die Simulationsmodelle der Dynamik sind erstellt und

implementiert, erste Regelungsversuche wurden durchgeführt. Ein zweiachsiger Soft-Roboterarm zur experimentellen Untersuchung der dynamischen Wechselwirkung der nachgiebigen Gelenken ist zusammengebaut und befindet sich in der Testphase.

3.2 Verbundprojekt KoBSAR

Im Forschungsverbund haben sich drei Projektpartner aus wissenschaftlicher Forschung, industrieller Forschung und Entwicklung und klinischer Anwendung zusammengeschlossen:

- FWBI Friedrich-Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft m.b.H., Bremen (Verbundkoordinator);
- Dr. Paul Koch GmbH, Frickenhausen
- Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Klinikums Stuttgart (Akademisches Lehrkrankenhaus)

Das Verbundvorhaben unterteilt sich in drei zwar thematisch abgegrenzte, jedoch sich ergänzende Teilprojekte, die jeweils von einem Verbundpartner entsprechend seiner fachlichen Kompetenzen bearbeitet werden.

Das Teilprojekt *Gesamtkonzept, Antriebe und Regelung* wird durch den Verbundkoordinator FWBI bearbeitet und befasst sich mit der Konzipierung, Erforschung und Weiterentwicklung der neuartigen fluidischen Antriebe mit elastischen Rotationsarbeitskammern sowie deren exakter Regelung zur Erzeugung der nach medizinisch-technischen Vorgaben erforderlichen Bewegungsabläufe. Das Teilprojekt umfasst folgende Aufgabenstellungen:

- Anwendungsspezifische Auswahl von Formen, Materialien und Untersuchung der Grundeigenschaften neuartiger fluidischer Antriebselemente;
- Antriebs- und anwendungsspezifische Regelungsstrategien;
- Optimierung sensorielle Ausstattung; Entwurf , Realisierung, theoretische und experimentelle Untersuchungen der Regelungsalgorithmen;
- Entwicklung und Implementierung anwendungsspezifischer Bediengeräte und eines integrierten Informationssystems;
- Aufbau und die von den Testergebnissen abhängige Nachbesserung funktionsfähiger Versuchsmuster-Demonstratoren.

Die realisierten experimentellen Versuchsmuster-Antriebe werden in die vom Projektpartner Dr. Paul Koch GmbH entwickelten Schienenmechaniken integriert und mit entsprechenden Regelungsvorrichtungen ausgestattet dem Projektpartner Klinikum Stuttgart zum Testen in der klinischen Umgebung übergeben. Die entwickelten Bediengeräte sowie das integrierte Informationssystem kommen ebenfalls in der Klinik zum Testeinsatz. Das Teilprojekt setzt sich aus sechs Arbeitspaketen zusammen, die im nachstehenden Gantt-Diagramm (Tabelle 2) aufgelistet sind.

Das Teilprojekt *Schienenmechanik und Konstruktion*, das vom Verbundpartner Dr. Paul Koch GmbH bearbeitet wird, befasst sich mit der Konstruktion der Bewegungsmechanismen für unterschiedliche Gelenke der oberen und unteren Extremitäten basierend auf neuartigen fluidischen Antriebe mit elastischen Rotationsarbeitskammern. Neben der Kernfrage – Konstruktion einachsiger sowie mehrachsiger Schienenmechaniken für obere und untere Extremitäten unter Berücksichtigung des Modularitäts- bzw. Baukastenprinzips der Gesamtentwicklung – wird auf die folgenden Probleme eingegangen:

- Auswahl geeigneter Anbindungsmethoden des Bewegungsmechanismus an die Gliedmaßen (Extremitäten) des Patienten;
- Konzepte und Realisierung der anwendungsspezifischen Druckmedierversorgung;
- Konzepte der technischen Sicherheits- sowie Benutzerkomfortmaßnahmen einschließlich Minimierung der Geräuschentwicklung;
- technische Begleitung der klinischen Tests.

Basierend auf den nach dem erfolgreichen Abschluss des Vorhabens vorliegenden Prototypen werden verkaufsfähige Bewegungstherapiegeräte weiterentwickelt und hergestellt.

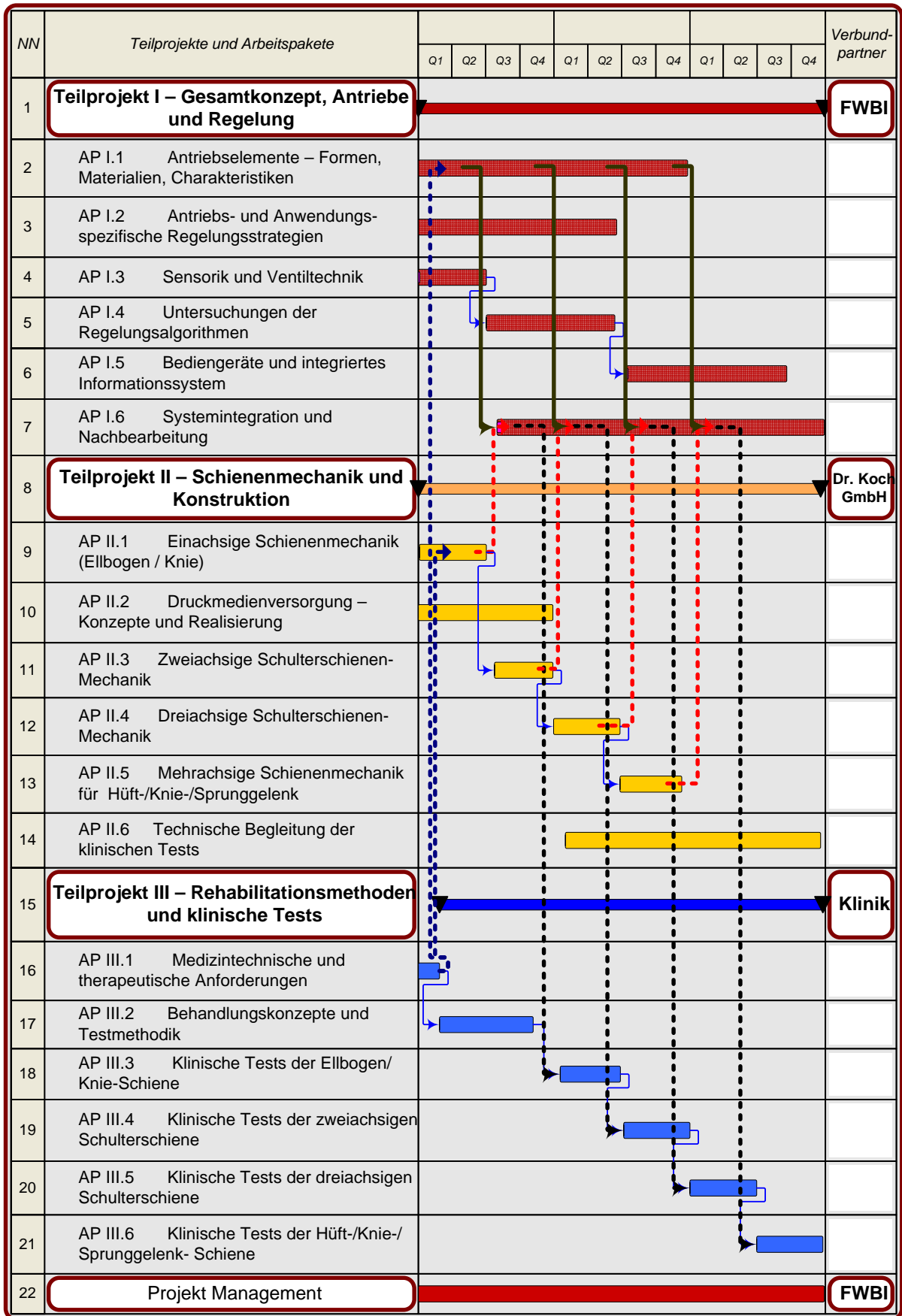
Die Bearbeitung des Teilprojektes *Rehabilitationmethoden und klinische Tests* wird vom Verbundpartner Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Klinikums Stuttgart übernommen. Das Teilprojekt befasst sich mit Behandlungskonzepten, Testmethoden und klinischen Tests der patienten-kooperierenden Bewegungstherapieschienen für unterschiedliche Gelenke der oberen und unteren Extremitäten:

- Medizintechnische Anforderungen – Festlegung der Bewegungsbereiche/Bewegungsmuster, krankheitsbezogene Sicherheitsanforderungen und Konzepte;
- Behandlungskonzepte und Testmethodik - Dauer der Schienenanwendung, durchzuführende Bewegungsabläufe – passiv, aktiv oder assistiv – abhängig vom Krankheitsbild und Behandlungsstadium;
- Klinische Tests einachsiger sowie mehrachsiger Bewegungsschienen für obere und untere Extremitäten einschließlich randomisierter Zuordnung der Patienten zur Kontroll- und Behandlungsgruppen, Dokumentieren des Krankheitsbildes und Therapie, sowie statistischer Auswertung der Therapieergebnisse.

Die neue Gestaltung der entsprechenden Rehabilitationstechnik schafft die Grundlage für neue Wege und weitergehende orthopädisch-medizinische Forschungen. Dadurch können die Erfolgsaussichten des Einsatzes derartiger Rehabilitationsmethoden bei der orthopädischen Therapie erheblich verbessert werden.

Der zeitliche Verlauf der Projektarbeiten und Abstimmung der jeweiligen Arbeitspakete verschiedener Teilprojekte wird in dem nachfolgenden Gantt-Diagramm (s. Tab. 2) dargestellt. Der planmäßige Projektbeginn ist der 01. Oktober 2007, die Projektlaufzeit beträgt 36 Monate (Bewilligungsbescheid vom 09.01.2008).

Tabelle 2: Gantt-Diagramm des Verbundprojektes KoBSAR



Zusammenfassung

Die dargestellten Ansätze zeigen, wie weit der Weg von wissenschaftlichen Erkenntnissen und Forschungsergebnissen bis zur Umsetzung solcher Ergebnisse in marktfähige technische Erzeugnisse ist. Dieser Weg ist umso weiter, je anspruchsvoller die notwendigen technischen Lösungen sind, welche für die gewünschten Umsetzungen benötigt werden.

Bereits die Arbeiten im ZUTECH-Forschungsvorhaben ZN 113 haben gezeigt, welche Fülle technisch-wissenschaftlicher Fragen entsteht, wenn man sich darum bemüht, die technisch einleuchtenden Konzepte der Leichtbauroboter mit flexiblen, nachgiebiger Gelenken in marktreife Produkte umzusetzen. Vielfältige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sind zu lösen. Zu werkstofftechnischen Fragen gehören hier z. B. die kunststofftechnischen Herstellungsverfahren und das Erreichen ausreichender Festigkeiten und Dauerstandseigenschaften. Unterschiedliche konstruktive Lösungen sind zu entwerfen und gegeneinander abzuwägen. Selbst bei gleichem Funktionskonzept sind zahlreiche unterschiedliche technische Ausführungen möglich. Umfassend sind auch die Fragen mess- und systemtechnischer Art: mikroelektronische und mechatronische Integration möglichst kleiner und funktionstüchtiger Bauelemente, Messfühler, Stellglieder, Konzepte der Regelung und Steuerung und deren Implementierung. Keineswegs lassen sich derartige anspruchsvollen technischen Konzepte optimal umsetzen, indem man auf marktgängige Materialien oder Bausteine oder bereits existierende systemtechnische Lösungen zurückgreift. Im Gegenteil: Der anspruchsvolle technische Lösungsansatz erzeugt ein breites Spektrum von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, die auf dem ersten Blick auch Nebengebiete betreffen, letztlich jedoch einen breiten Schweif von Innovationen nach sich ziehen. Die Durchführung eines interdisziplinären Forschungsvorhabens in Gestalt von PortaSOR ist also ein notwendiger Schritt auf dem Weg von der reinen Forschung zur marktnahen Umsetzung.

Wenn bei KoBSAR auch gleiche Funktionskonzepte wie bei PortaSOR zu den tragenden Gedanken gehören, so ist das Forschungsvorhaben vom Gesamtansatz doch grundverschieden. In Teilen, nämlich hinsichtlich der Funktionen und Eigenschaften der zu verwendenden Gelenkmodulen, baut das Forschungsvorhaben Por-

taSOR auf. Dieses betrifft jedoch vorrangig einen Teil der notwendigen innovativen Hilfsmittel, die zwar unentbehrlich sind, aber letztlich hinter zentralen medizintechnischen Fragestellungen der Rehabilitationstherapie verschwinden. Es geht darum, die Therapieverfahren mittels Bewegungstherapie-Geräten grundsätzlich in Richtung auf eine patientenadaptierbare Kombination von abgestuft passiven und aktiven Therapiemethoden und auf grundsätzliche Verbesserungen der Beobachtbarkeit des Therapieablaufs und der Einflüsse auf Therapiefortschritte weiterzuentwickeln. Zur Lösung ist das Zusammenwirken von Fachleuten sehr unterschiedlichen Wissens- und Erfahrungshintergrundes erforderlich. Fachleute der Systemtechnik, welche die notwendigen Bindeglieder des Gesamtsystems herausfinden, arbeiten in diesem Projekt mit Ärzten und Therapeuten einer einschlägig erfahrenen Klinik sowie mit einem sehr erfahrenen Medizin-Geräte-Entwickler zusammen.

Literatur

- [1] Hirzinger, G., Sporer, N., Schedl M., Butterfaß J., Grebenstein M. Torque-Controlled Lightweight Arms and Articulated Hands: Do We Reaching Technological Limits Now? *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 4–5, April–May 2004, pp. 331-340.
- [2] Abu-Schaffer A., A. Bicchi, G. Boccadamo, R. Chatila, A. De Luca, A. De Santis, G. Giralt, G. Hirzinger, V. Lippiello, R. Mattone, R. Schiavi, B. Siciliano, G. Tonietti, and L. Villani. *Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains: Safety and Dependability*. Proc. 4th IARP/IEEE-EURON Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, 2005.
- [3] Pratt G., Williamson M. Series Elastics Actuators. Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, 1995, pp. 399-406
- [4] Zinn M., Roth B., Khatib O., Salisbury J. K. A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 4–5, April–May 2004, pp. 379-398
- [5] Tonietti G., Schiavi R., Bicchi A. Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction: Proc. ICRA 2005, pp. 528-533
- [6] Noritsugu, T., Tanaka, T., and Yamanaha, T.. Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot. Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, Tsukuba, Japan, 1996.
- [7] Pack, R. T., Christopher, J. L. Jr., Kawamura, K. A rubber-tuator-based structure-climbing inspection robot. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, pp. 1869– 1874, 1997.
- [8] Kawamura, K., Peters R.A. II, Wilkes D.M., Alford W.A., Rogers T.E. ISAC: Foundations in Human-Humanoid Interaction, IEEE Intelligent Systems, July/August 2000, pp. 38-45
- [9] D.G. Caldwell, N. Tsagarakis, G.A. Medrano-Cerda, J. Schofield, S. Brown, "A pneumatic muscle actuator driven manipulator for nuclear waste retrieval", *Control Engineering Practice*, Vol. 9, pp. 21-36, 2001

- [10] K. Kawashima, T. Sasaki, T. Miyata, N., Nakamura, M. Sekiguchi, T. Kagawa, "Development of Robot Using Pneumatic Artificial Rubber Muscles to Operate Construction Machinery", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16 No. 1, 2004.
- [11] B. Tondu, S. Ippolito, J. Guiochet, A. Daidie, "A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles fro Humanoid Robots", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4–5, April 2005, pp. 257-274.
- [12] Daerden F., Lefeber D. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation, *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47(1):10–21, 2002.
- [13] Schulte R.A. The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle. The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, publ. 874, Nas-RC, pp.94-115, 1962
- [14] www.festo.com
- [15] Kerscher T., Albiez J., Zöllner J. M., Dillmann R. AirInsect - A New Innovative Biological Inspired Six-Legged Walking Machine Driven by Fluidic Muscles, *Proceedings of IAS 8, The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*, Amsterdam, March 10-13, 2004
- [16] www.shadow.org.uk
- [17] Daerden F., Lefeber D. The Concept and Design of Plated Pneumatic Artificial Muscles. *Int. J. of Fluid Power*, vol. 2, no. 3, pp. 41-50, 2001
- [18] Granosik G., Borenstein J. Integrated Joint Actuator for Serpentine Robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 10, no. 5, Oktober 2005, pp.473-481
- [19] Tsagarakis N., Caldwell D. (2003) Development and Control of a 'Soft-Actuated' Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training, *Autonomous Robots*, 15, pp 21-33.
- [20] Ishii M., Yamamoto K. Hyodo K. (2005) A Stand-Alone Wearable Power Assist Suit - Development and Availability-, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.17 No.5, pp.575-583.
- [21] Kobayashi H., Uchimura A., Isihida Y., Shiiba T., Hiramatsu K., Konami M., Matsushita T., Sato Y. (2004) Development of a muscle suit for the upper body—realization of abduction motion, *Advanced robotics*, Vol. 18, No. 5, pp. 497-513.
- [22] www.kineticmuscles.com
- [23] He J., Koeneman E.J, Schultz R.S.; Herring D.E., Wanberg, J., Huang, H., Sugar, T., Herman R., Koeneman J.B. (2005) RUPERT: a Device for Robotic Upper Extremity Repetitive Therapy, *27th IEEE Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*.
- [24] Ferris D.P., Czerniecki J.M., Hannaford B. (2005) An ankle-foot orthosis powered by artificial pneumatic muscles. *Journal of Applied Biomechanics* 21, 189–197.
- [25] Costa N, Bezdicek M, Brown M, Gray J, Caldwell D.G., Hutchins S. (2006) Joint Motion Control of a Powered Lower Limb Orthosis for Rehabilitation, *International Journal of Automation and Computing* 3, 271-281
- [26] Noritsugu T., Tanaka T. (1997) Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot, *IEEE/ASME Transactions Mechatronics*, Vol 2. No. 4, pp. 259-267.
- [27] Tsagarakis N., Caldwell D. (2003) Development and Control of a 'Soft-Actuated' Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training, *Autonomous Robots*, 15, pp 21-33.
- [28] Ivlev O., Mihajlov M., Wendland E., Gräser A. Neuartiges Leichtbau-Roboter-Baukastensystem mit elastischen fluidischen Gelenkmodulen für zahlreiche Anwendungsgebiete in der Produktion und Handhabungstechnik. *Deutsche Forschungsvereinigung für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. (DFMRS), 9. DFMRS-Fachtagung 2006*

- [29] Schulz S., Kargow A., Pylatiuk Ch., Werner T., Klosek H., Breitwieser H., Oberle R., Rößler W., Bretthauer G. Entwürfe von neuartigen Leichtbaurobotern mit pneumatisch betätigten Gelenkmodulen auf der Basis flexibler Antriebselemente. Deutsche Forschungsvereinigung für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. (DFMRS), 9. DFMRS-Fachtagung 2006
- [30] Mihajlov M., Hübner M., Ivlev O., Gräser A. (2006) Modelling and Control of Fluidic Robotic Joints with Natural Compliance; Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Control Applications, October 2 - 4, Munich, Germany
- [31] Ivlev O, Mihajlov M., Wendland E., Gräser A. (2006) New Compliant Fluidic Rotary Actuators for Soft Service and Assistance Robotics, ACUATOR 2006, Proceedings of the 10th International Conference on New Actuators, June 14 – 16, pp. 1033-1036, Bremen