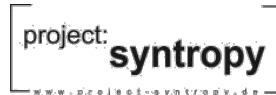


# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF, Magdeburg Technische Universität Berlin, Fachgebiet Regelungssysteme, Berlin [project:syntropy] GmbH, Magdeburg	Förderkennzeichen: 01RB0809A  01RB0809B  01RB0809C
Projektpartner ohne Zuwendung: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin Festo AG & Co. KG, Ostfildern, Scharnhausen	
Vorhabenbezeichnung: Verbundvorhaben: Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboteranwendung in der Mensch-Maschine- Interaktion - BROMMI	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2009 bis 31.08.2012	
Berichtszeitraum: 01.04.2009 bis 31.08.2012	

## Projektpartner



Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „BIONA – Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien gefördert und vom Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (PT-DLR) betreut.



## Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung.....	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.1.1	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen .....	4
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
I.3.1	Ressourcenplanung.....	5
I.4	Stand von Wissenschaft und Technik.....	10
I.4.1	Entwicklung bionisch inspirierter Kinematiken .....	10
I.4.2	Der pneumatische Muskel und dessen Regelung.....	11
I.4.3	3D-Objekterkennung .....	13
I.4.4	Angaben zur verwendeten Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste	14
I.5	Zusammenarbeit der Projektpartner und anderen Stellen.....	16
I.5.1	Kommunikation, Arbeitskreise, Workshops.....	16
I.5.2	Koordination und Projektcontrolling .....	17
II.	Eingehende Darstellung .....	17
II.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	17
II.1.1	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens .....	17
II.1.1.1	Fraunhofer IFF .....	18
II.1.1.2	Technische Universität Berlin .....	20
II.1.1.3	[project:syntropy] GmbH.....	22
II.1.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	22
II.1.2.1	Fraunhofer IFF .....	22
II.1.2.2	TU Berlin .....	27
II.1.2.3	project:syntropy GmbH.....	32
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	34
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	34
II.4	Voraussichtlicher Nutzen (Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans) .....	35
II.4.1	Verwertungsplan Fraunhofer IFF.....	35
II.4.2	Verwertungsplan TU Berlin.....	38
II.4.2.1	Wissenschaftliche Verwertung.....	38
II.4.2.2	Die technologische Verwertung.....	40
II.4.2.3	Die wirtschaftliche Verwertung .....	40
II.4.2.4	Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten.....	40

II.4.2.5	Wissenschaftliche Erfolgsaussichten .....	40
II.4.2.6	Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit .....	41
II.4.3	Verwertungsplan [project:syntropy] GmbH .....	41
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	42
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	43
II.6.1	Veröffentlichungen Fraunhofer IFF .....	43
II.6.2	Veröffentlichungen TU Berlin.....	43
II.6.2.1	Paper .....	43
II.6.2.2	Eingeladene Vorträge.....	44
II.6.3	Veröffentlichungen [project:syntropy] GmbH .....	44

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele für die technische Umsetzung des Rüsselprinzips .....	10
Abbildung 2: Multigelenk, Serielle Modularkinematik .....	19
Abbildung 3: Tripedale Alternanzkaskade .....	20
Abbildung 4: Schematisches Spindelgetriebe und Motorlager .....	23
Abbildung 5: Konstruktion Multigelenk.....	24
Abbildung 6: Prinzipschema Bionische Vorsteuerung.....	25
Abbildung 7: Serielle Modularkinematik (SMK) mit fünf Gelenken .....	26
Abbildung 8: Kraftbelastung des dreiarmligen großen Sterns .....	27
Abbildung 9: Tripedale Alternanzkaskade (TAK) in unterschiedlichen Posen .....	28
Abbildung 10: Tripedale Alternanzkaskade (TAK) .....	29
Abbildung 11: Tripedale Alternanzkaskade (TAK) in der Anwendung .....	31
Abbildung 12: Greiferbacken mit angebrachten Markern.....	32
Abbildung 13: Prozess der Objekterkennung .....	33
Abbildung 14: Demonstrator SMK auf der AUTOMATICA 2012 in München .....	36
Abbildung 15: Präsentation der SMK auf den 14. IFF-Wissenschaftstagen .....	37
Abbildung 16: Bionischer Handling-Assistent .....	42

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektplan BROMMI – Demonstrator SMK (IFF), Stand Mai 2010 .....	7
Tabelle 2: Projektplan BROMMI - Demonstrator TAK (TUB), Stand Mai 2010.....	9
Tabelle 3: Projekttreffen, Meilensteintreffen, Workshops und Tagungen .....	17
Tabelle 4: Kosten- und Personalkapazitätsstruktur .....	34

## **I. Kurze Darstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Aktuell müssen Roboter aus Sicherheitsgründen noch abgeschirmt hinter Schutzeinrichtungen agieren, die Mensch und Roboter strikt voneinander trennen. Der Grund dafür ist das Gefahrenpotential, welches von herkömmlichen Knickarmrobotern ausgeht. Eine direkte Interaktion zwischen Mensch und Maschine kann somit oftmals nicht stattfinden, kooperative und kollaborative Einsatzmöglichkeiten zwischen Mensch und Roboter sind sehr stark eingeschränkt bzw. unmöglich.

Ziel des Verbundvorhabens BROMMI war die Entwicklung, der Aufbau und die Erprobung von Robotern nach dem biologischen Vorbild des Elefantenrüssels zur sicheren Anwendung in der Maschine-Mensch-Interaktion. Auf der Basis von bionischen Prinzipien wurden alternative Ansätze flexibler Roboterkinematiken nach dem bionischen Vorbild eines Elefantenrüssels realisiert. Das Projektziel waren völlig neue Kinematikkonzepte mit inhärenten Eigenschaften wie Nachgiebigkeit, sicherheitsrelevanten Aspekten wie Kinematiken ohne Scherstellen und gegenläufige Bewegungen, großem Arbeitsraum sowie einer Bildverarbeitung zum Erkennen und gezielten Greifen von Objekten im Arbeitsraum. Zudem stand die Umsetzung einer rüsselähnlichen Bewegung der Roboter mit im Vordergrund.

Die in der Robotik neuen Konstruktions- und Wirkprinzipien sollen sicherstellen, dass von dem Roboterarm selbst bei Fehlfunktion kein Gefahrenpotential für den Menschen ausgeht. Es ergeben sich vielfältigste Einsatzmöglichkeiten im Life-Science Bereich, in der industriellen Produktion und im Pflege- und Domestikbereich.

#### **I.1.1 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Die Förderrichtlinie „BIONA - Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien“ verfolgte das Ziel, durch Verbundvorhaben den Aufbau strategischer Partnerschaften zwischen Bildung, Wissenschaft und Wirtschaft voranzutreiben. Das Verbundvorhaben BROMMI, mit dem Ziel der Entwicklung, des Aufbaus und der Erprobung einer innovativen, nachgiebigen und sicheren Roboterkinematik nach biologischem Vorbild, entsprach in vollem Umfang den Anforderungen der Bionik-Förderrichtlinie des BMBF.

Die Entwicklung der Demonstratoren orientierte sich an Konstruktionsprinzipien der Natur, der Elefantenrüssel diente als Vorbild. Ziel war es, die industrielle und wirtschaftliche Verwendbarkeit aufzuzeigen, die durch den bionischen Ansatz resultiert. In diesem interdisziplinären Projekt wurden Strukturen, Konstruktionsprinzipien und Funktionsweisen aus dem biologischen Vorbild in eine technische Umsetzung übertragen.

### **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Verbundvorhaben BROMMI wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger DLR betreut. Zwischen allen Verbundpartnern wurde entsprechend den Förderbedingungen des BMBF ein Kooperationsvertrag abgeschlossen, der zum Projektbeginn am 01. April 2009 in Kraft getreten ist. Die Projektkoordination lag in der Verantwortung des Fraunhofer IFF, das über umfangreiche Erfahrungen in der Leitung und Bearbeitung von großen Industrie- und öffentlich geförderten

Verbundvorhaben verfügt und mit komplexen Automatisierungslösungen und –strategien bestens vertraut ist. Das Projekt wurde mit der Technischen Universität Berlin, Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik und der [project:syntropy] GmbH durchgeführt. Die Firma FESTO AG hat als nicht gefördertes Mitglied im Verbundvorhaben bei der Konzeption mitgewirkt. Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) begleitete das Projekt hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Im Folgenden werden die Arbeitspakete und der Personaleinsatz des Projektes beschrieben und die daran beteiligten Projektpartner aufgeführt. Bei Abschluss des Arbeitspaketes 1 wurde zwischen den Projektpartnern und dem Projektträger DLR vereinbart, zwei unterschiedliche Konzepte und Demonstratoren zu entwickeln und aufzubauen. Eine Kinematik ist die „Serielle Modularkinematik (i.F. SMK) des Fraunhofer IFF, die aus elektrisch angetriebenen Multigelenken aufgebaut ist. Die andere Kinematik ist die „Tripedale Alternanzkaskade“ (i.F. TAK) der TU Berlin, die ausschließlich pneumatisch betrieben wird. Mit dem Änderungsbescheid Nr. 2 vom 03. September 2010 hat der Projektträger dem modifizierten Arbeits- und Zeitplan der kosten- und ausgabenneutralen Änderung zugestimmt. Im weiteren Bericht werden fortan nur Bezug auf die aktualisierten Projektdaten (Arbeitspakete und Meilensteine) genommen. Für den Demonstrator „Serielle Modulkinematik“ SMK ist das Fraunhofer IFF verantwortlich und für den Demonstrator „Tripedale Alternanzkaskade“ TAK die Technische Universität Berlin.

#### **I.3.1 Ressourcenplanung**

Durch die inhaltliche Projektänderung hinsichtlich der Entwicklung von zwei Demonstratoren mit jeweils unterschiedlichen Entwicklungsschwerpunkten waren Änderungen in der Ausrichtung der einzelnen Arbeitspakete und der personellen Ressourcen bei den Projektpartnern Fraunhofer IFF und TU Berlin notwendig geworden. Die Entwicklungsphasen der beiden Demonstratoren (AP 2 bis AP 4) verliefen im Detail unabhängig voneinander, es erfolgte aber permanent eine Abstimmung zwischen dem IFF und der TUB. Die Konzeptphase (AP 1) und die Systemerprobung (AP 5) erfolgten gemeinsam durch die TU Berlin und das Fraunhofer IFF. Die Projektpartner project:syntropy, Festo und das IFA wurden bei der Entwicklung gleichermaßen hinzugezogen, ihre Arbeitsinhalte und der Personalumfang blieben bei der Entwicklung von zwei Demonstratoren unverändert. Die von project:syntropy zu entwickelnde 3D-Objekterkennung ist für beide Demonstratoren gleichermaßen einsetzbar.

Die Tabelle 1: Projektplan BROMMI – Demonstrator SMK (IFF), Stand Mai 2010 zeigt den Projektplan für den Aufbau und die Inbetriebnahme des Demonstrators Serielle Modularkinematik (SMK) mit den modifizierten Arbeitsinhalten und Arbeitszeiten. In Tabelle 2: Projektplan BROMMI - Demonstrator TAK (TUB), Stand Mai 2010 sind die Arbeitspakete für den Aufbau und die Inbetriebnahme des Demonstrators Tripedale Alternanzkaskade (TAK) dargestellt.

Die Projektpläne wurden mit dem Änderungsbescheid Nr. 2 des Projektträgers bestätigt. Dem voraus ging ein von allen Konsortialpartnern beschlossener Änderungsantrag, der am 20. Mai 2010 beim PT DLR eingereicht worden ist.

Projektplan BROMMI																						
Aktualisierung - Aufbau 2 Demonstratoren Mai 2010																						
Demonstrator: <b>Serielle Modulkinematik (SMK)</b>																						
verantwortlich: IFF																						
(*): Die Kapazitäten der Projektpartner project:syntropy, Festo und IFA werden nicht auf die beiden Demonstratoren aufgeteilt, da deren Personaleinsatz nahezu identisch ist wie bei der Entwicklung eines Demonstrators.																						
Personenmonate PM																						
AP	Bezeichnung	Fraunhofer IFF	TU-Berlin	project:syntropy (*)	IFA (*)	FESTO (*)				II / 2009	III / 2009	IV / 2009	I / 2010	II / 2010	III / 2010	IV / 2010	I / 2011	II / 2011	III / 2011	IV / 2011	I / 2012	
1.	<b>Definition der Anforderungen und Konzeptbildung</b>																					
1.1	Analyse biologischer Vorbilder	0,5	0,5																			
1.2	Ableitung technischer Modelle	1	1	0,5																		
1.3	Analyse der Anforderungen und Definition der Aufgaben des Systems	0,5	0,5	0,5	1																	
1.4a	Entwurf verschiedener pneumatisch und elektrisch angetriebener Kinematiken (TUB AP 1.4)	5			1																	
1.5	Auswahl und Konzeptverfeinerung einer Kinematik	4				1																
1.6	Kinematische Modellbildung	2																				
1.9	Entwicklung eines Sensorkonzeptes für den jeweiligen Demonstrator	2		1,5																		
2.	<b>System- und Komponentenentwicklung</b>												M1									
2.1a	Konstruktion von Funktionsmustern mit Multigelenken	2																				
2.1b	FEM-Analyse Multigelenk	1																				
2.1c	Auslegungen der Antriebe	1																				
2.1d	Berechnung der Kinematik des Multigelenks	2																				
2.1e	Konstruktion einer nachgiebigen Gelenk-Lagerung	4																				
2.2	Verifizierung der Kinematik an den Funktionsmustern	1				1																
2.3a	Entwicklung einer Steuerungsstrategie und -modulen für Multigelenke	4																				
2.5	Aufbau einer zentralen Hauptsteuerung	2																				
2.6	Entwicklung von Software für die Hauptsteuerung	3																				
2.8	Umsetzung der mechanisch-konstruktiven Sicherheitsanforderungen (passive Sicherheit)	2				1																
2.9	Umsetzung der steuerungsseitigen Sicherheitsanforderungen (aktive Sicherheit)	2				1																
2.10	Analyse und Auswahl geeigneter Verfahren zur 3D-Objekterkennung im Zielgebiet				4																	
3.	<b>Realisierung</b>												M1a									
3.3	Aufbau von Modulen für den Demonstrator	2																				
3.3a	Erweiterung der Steuerungsstrategie für Gesamtkinematik	3																				
3.5	Aufbau und Softwareintegration der Bildverarbeitungsmodule				7																	



<b>Projektplan BROMMI</b>																						
Aktualisierung - Aufbau 2 Demonstratoren Mai 2010																						
<b>Demonstrator "Tripedale Alternanzkaskade" (TAK)</b>																						
<b>verantwortlich: TUB</b>																						
(*) Die Kapazitäten der Projektpartner project:syntropy, Festo und IFA werden nicht auf die beiden Demonstratoren aufgeteilt, da deren Personaleinsatz nahezu identisch ist wie bei der Entwicklung eines Demonstrators.																						
Personenmonate PM																						
AP	Bezeichnung	Fraunhofer IFF	TU-Berlin	project:syntropy (*)	IFA (*)	FESTO (*)				II / 2009	III / 2009	IV / 2009	I / 2010	II / 2010	III / 2010	IV / 2010	I / 2011	II / 2011	III / 2011	IV / 2011	I / 2012	
1.	<b>Definition der Anforderungen und Konzeptbildung</b>																					
1.1	Analyse biologischer Vorbilder	0,5	0,5																			
1.2	Ableitung technischer Modelle	1	1	0,5																		
1.3	Analyse der Anforderungen und Definition der Aufgaben des Systems	0,5	0,5	0,5	1																	
1.4	Entwurf verschiedener pneumatischer Kinematiken (siehe auch AP 1.4a)		2		1																	
1.5	Auswahl und Konzeptverfeinerung einer Kinematik		3			1																
1.6	Kinematische Modellbildung		2																			
1.7	Dezentrale steuerungstechnische Modellbildung		4																			
1.8	Regelungstechnische Modellbildung		3			1																
1.9	Entwicklung eines Sensorkonzeptes für den jeweiligen Demonstrator		2	1,5																		





## I.4 Stand von Wissenschaft und Technik

### I.4.1 Entwicklung bionisch inspirierter Kinematiken

Bionische Ansätze zur Entschärfung der Knickarm-Roboter- Problematik wurden z.B. mit dem „elastischen Antrieb“ BioRob in verschiedenen Projekten umgesetzt. Hierbei wird auf der Basis eines Knickarmes ein Ausweichen durch ein federnd ausweichendes Antriebsseil realisiert. Vorteil ist, dass alle Motoren und ihr Gewicht nicht im Arm sitzen, sondern am Armansatz und die Positioniergenauigkeit nicht durch Steifigkeit, sondern durch Gegenregelungen erreicht werden. Auf diese Weise wird das Gewicht der bewegten Massen reduziert.

An der TU Berlin wurde mit Hilfe pneumatischer Muskeln der Robotertorso ZAR5, bestehend aus zwei Armen und zwei 5-fingrigen Händen, aufgebaut. Eine Gelenknachgiebigkeit wird durch Kraftmessungen an den pneumatischen Muskeln realisiert.

Der von der Firma FERrobotics (Österreich) entwickelte Knickarmroboter ROMO ist mit pneumatischen Muskeln ausgestattet, die in der umgesetzten Ausführung nur als Längsmuskeln agieren.

Einige Entwicklungen aus der Vergangenheit bedienen sich ansatzweise des Wirkprinzips des Elefantenrüssels und zeigen erste technische Einsatzmöglichkeiten auf. Das Einsatzgebiet beschränkt sich in der Regel auf das Führen eines Werkzeuges oder einer Kamera in einem nicht zugänglichen Objekt. Die Entwicklung des „OCTArm“, siehe Abbildung 1 – Bild 1, basiert grundsätzlich auf dem Rüsselprinzip, ist aber eher ein Greifer als ein Manipulator; DARPA und NASA fixierten mithilfe eines derartigen Greifers Bälle in Wasser. Die englische Firma OCRobotics hat eine Schlangenkinematik auf Basis eines Skelettes mit Seilzug entwickelt.

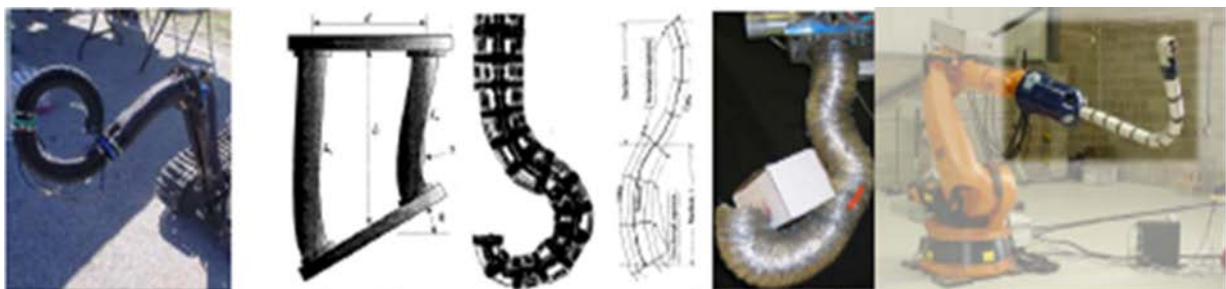


Abbildung 1: Beispiele für die technische Umsetzung des Rüsselprinzips

Unter dem Stichwort „Rüssel“, „Wurm“, „Schlange“ oder allgemeiner „kontinuierliche“ bzw. „hyperredundante“ Kinematiken sind viele Lösungsansätze bekannt. Allen Ansätzen ist bei näherer Betrachtung ein gegliederter Grundaufbau eigen.

Longitudinale Versteifungstechniken existierender „Elefantenrüssel-Roboter“ basieren nicht auf dem Quermuskel-Prinzip des bionischen Vorbilds: (v.l.n.r.) „OCTArm“ [24] wird als Greifer eingesetzt. Den Grundaufbauplan zeigt hierzu Bild 2 mit dem antagonistischen pneumatischen Muskel. OCTArm nutzt dieses Prinzip zur Abwinklung der planaren Ansatzflächen. Der „Rice/Clemenson-Elephant Trunc“ [25] (Bild 3) basiert auf einer abgefederten Kette zentraler Kugelgelenke, alternativ findet sich (Bild 4) eine mittig gelegene

„Gummi-Wirbelsäule“ (sic!) als Gegenkraft. Air-Octor (Bild 5) reguliert seine Steifigkeit zudem durch einen pneumatischen Innendruck. Diese Ansätze werden mithilfe von Schnüren aktuiert, ebenso wie ein Schlangenarm der Firma OCRobotics. Eine Rüsselkinematik kommt aktuell in der Industrie noch nicht zum Einsatz.

Der assoziierte Projektpartner Festo [27] hat einen bionischen Handling-Assistenten entwickelt, der ebenfalls auf dem Elefantenrüsselprinzip beruht. Der flexible Greifarm besteht aus einem künstlichen Arm, einem Handgelenk und einem 3-Finger Greifer. Der künstliche Arm und das Handgelenk wurden aus speziellen Balgelementen aufgebaut. Durch die gezielte Beaufschlagung dieser Elemente mit Druckluft werden die rüsselartigen Bewegungen des Arms initiiert. Die Struktur der Balgelemente wirkt wie eine Feder und führt bei Entlastung das zuvor gestreckte Element in seine Ausgangslage zurück. Für das Erkennen und sichere Greifen von Objekten ist im Greifer ein Kamerasystem integriert worden.

#### **I.4.2 Der pneumatische Muskel und dessen Regelung**

In der Automatisierungstechnik, insbesondere der Robotik, sind die fluidischen Muskeln DMSP der Firma Festo derzeit noch wenig eingesetzt. Die bionischen Muskeln bestehen im Wesentlichen aus einem hohlen Elastomerzylinder mit eingebetteten Aramidfasern. Wird der Muskel mit Luft befüllt, vergrößert sich dieser im Durchmesser und wird in der Länge kontrahiert. Dadurch wird eine fließende, elastische Bewegung ermöglicht. Durch Einsatz des fluidischen Muskels werden Bewegungsabläufe möglich, die in Kinematik, Geschwindigkeit, Kraft, aber auch Feinheit menschlichen Bewegungen nahe kommen. Sie haben bezogen auf den Servicerobotikmarkt und die mobile Robotik einige entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Antriebssystemen. Der fluidische Muskel hat eine hohe gewichtsbezogene Leistung, produziert Zugkräfte ohne Ruckgleiten, ist hoch dynamisch, benötigt keine Haltekräfte, ist ein hermetisch abgeschlossenes System ohne Leckage, ist inhärent nachgiebig und elastisch, ist medienbeständig, benötigt keine Schmierung und ist relativ einfach über eine Druckregelung zu positionieren.

Es müssen neue Wege gefunden werden, die nachgefragten Eigenschaften von Produkten schon an der Basis konsequent bereitzustellen. Ist ein leichter, mobiler und nachgiebiger Roboter gefragt, sollte man Aktuatoren einsetzen, die diesen Eigenschaften genügen. Nach derzeitiger Meinung werden Roboter starr konstruiert und über komplizierte Regelungsalgorithmen wird Nachgiebigkeit erzeugt. Neuere Einsatzbereiche fordern aber sichere, elastische und nachgiebige Eigenschaften mit einem vertretbaren Maß an Steuerungs- und Regelungsaufwand.

Aktuelle Demonstratoren an Universitäten und Forschungseinrichtungen zeigen deutlich, dass starre Kinematiken mit relevantem Handhabungsgewicht diese Eigenschaften nicht in ausreichendem Maße erfüllen und die Sicherheit nicht oder nur mit erheblichem technischem Aufwand und Mehrkosten umgesetzt werden kann.

Da Aktuatoren mit einstellbarer Steifigkeit wie die fluidischen Muskeln der Firma Festo erst relativ neu am Markt sind, existiert weder ein allgemeingültiges Modell noch eine robuste alltagstaugliche Regelung.

Frühere Entwicklungen wie der McKibben Muskel [4-8] und der Muskel der Firma Shadow sind modelliert und in diesem Sinne regelbar. Die Hauptnachteile dieser Aktuatoren sind ihre

nichtindustrielle Herstellung und ihre fehlende Eigenstabilität. Der McKibben Muskel wird nicht mehr hergestellt. Der Shadow Muskel als Nachfolger gleicht weitestgehend dem McKibben Muskel und besteht aus den separaten Teilen einer inneren Gummimembran und eines äußeren Fasergeflechtes. Das Geflecht verhindert, dass bei Druckbeaufschlagung sich die Gummimembran unendlich ausdehnt, da sie die produzierte Volumenänderungsarbeit durch ihre Eigenelastizität nicht aufnehmen kann. Dieser Muskel muss deshalb vorgespannt betrieben werden, um den Durchmesser zu begrenzen. Er verschenkt sich dadurch den Bereich kleiner Innendrucke im Druck-Kraft-Längen-Diagramm.

Beim Festo Muskel [9] hingegen besteht die Muskelmembran aus einem Stück. Sie besteht aus mehreren Lagen eines Aramid-Fasergeflechtes, welches mit Chloropren als Füll- und Dichtstoff getränkt ist. Der Muskel ist eigenstabil und wird maschinell in verschiedenen Größen gefertigt. Leider existieren vom Hersteller nur statische Kennlinien pro Muskeltyp und ein Online-Auslegungstool. Dynamische Kennlinien oder besser ein physikalisches Modell fehlen gänzlich. Einige Veröffentlichungen der Entwicklungsabteilung von Festo aus 2002 und 2004 machen erste Vorschläge, wie der fluidische Muskel zu regeln ist [10-12]. Diese Ansätze basieren auf einer speziellen nichtlinearen Regelung, die in der Simulation gut funktionieren, aber es im praktischen Einsatz an Robustheit und Fehlertoleranz fehlen lassen. 2006 wurde das McKibben Modell um Quick-Release-Versuche erweitert [13], was aber die für den Festo Muskel real existierende, elastische Energie der Membranverformung außer Acht lässt. Ein Jahr früher wurde vom Mittragsteller ein auf den Festo Muskel zugeschnittenes Modell nicht nur für einen Muskel, sondern für ein antagonistisches Muskelpaar entwickelt [14]. 2006 kam dann eine auf diesem Modellansatz basierende Regelung im Humanoiden Muskel-Roboter-Torso ZAR5 zum Einsatz [15].

Konkret können die Entwicklungen im Projekt BROMMI prinzipiell in die Teilbereiche Modellbildung und Regelung unterschieden werden. Eine Regelung funktioniert immer nur so gut, wie das basale Modell der physikalischen Realität. Es sind die Zusammenhänge der aerodynamischen Bedingungen in den Anschlussschläuchen für die zugeführte und abgeführte Druckluft, der Geometrie des durch den Muskel aufgespannten Volumens, die thermodynamischen Beziehungen, die Gasgleichung, die isometrischen wie isotonischen Zeitkonstanten der verwendeten Muskeln, die mechanischen Zusammenhänge im Einzelmuskel, Kraftwirkung und die Materialeigenschaften und Konstanten der Muskelmembran für die Anwendung im Projekt BROMMI genauer untersucht worden. Daraus ergeben sich die nichtlinearen Teilmodelle in der Reihenfolge Strömungsmechanik, Thermodynamik, Geometrie, Elastomechanik, Drallsatzmechanik und kinematische Kopplung. Besonderes Augenmerk ist im Projekt BROMMI auf die Strömungsmechanik, da lange Schlauchleitungen erwartet werden, Elastomechanik, da noch ungenügend modelliert, und kinematische Kopplung, da eine neuartige Rüsselkinematik Gegenstand des Vorhabens ist, gelegt worden.

Das gesamte nichtlineare Modell, bestehend aus Teilmodellen der physikalischen Gegebenheiten am Gelenk eines antagonistischen Muskelpaares, diente als Basis sowohl für die Verschaltung und Kombination mehrerer Gelenkebenen pro Modul, als auch für die aufgesetzte Regelung.

In der Dissertation eines Mittragstellers ist das nichtlineare Gesamtmodell am Arbeitspunkt linearisiert und auf die speziellen Situationen an den Gelenken der Anwendung

ZAR5 angepasst worden. Mit diesem weitestgehend auf linearer Regelungstechnik beruhenden Regelungskonzept konnte ein messetauglicher Demonstrator mit 52 Muskeln unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Länge geregelt werden. Der Fokus der Regelung lag auf der Robustheit im praktischen Einsatz, der Skalierbarkeit für unterschiedliche Muskeltypen und Längen und der Implementierbarkeit auf Mikrocontrollern.

Im Projekt BROMMI wurde einerseits dieser robuste und praxistaugliche Regleransatz auf BROMMI übertragen und gefestigt und andererseits, ausgehend vom nichtlinearen Gesamtmodell, Ansätze nichtlinearer Regelungskonzepte untersucht und in der Praxis erprobt. Hierzu waren in Vorbereitung auf das Projekt BROMMI bereits erste Untersuchungen zu Relevanz, Praxistauglichkeit, Robustheit und Umsetzbarkeit auf Mikrocontrollern von nichtlinearen Regelungskonzepten wie das Gain Scheduling, das Modellreferenzverfahren, das Self Tuning Control oder das Flatness Based Control durchgeführt worden.

### **I.4.3 3D-Objekterkennung**

Die 3D-Objekterkennung erfährt derzeit in Forschung und Wissenschaft große Beachtung. Die Systeme basieren dabei meist auf der Verwendung von zwei oder mehreren Kameras und der Kombination verschiedener Bildverarbeitungsverfahren und -operatoren zur Segmentierung und Klassifizierung gesuchter Objekte.

Nach wie vor stellt die Berücksichtigung variabler Lichtverhältnisse für die gängigen Verfahren ein schwer lösbares Optimierungskriterium dar. Da die 3D-Objekterkennung nicht den Entwicklungsschwerpunkt des Projektes BROMMI darstellt, wurde in diesem Rahmen von nahezu konstanten Lichtverhältnissen ausgegangen.

Im Folgenden soll auf die aktuell gängigen Verfahren zur Objekterkennung eingegangen werden.

Für eine 3D-Objekterkennung und Klassifizierung wird häufig mit einer Datenbank von prototypischen Vergleichsformen in einem mehrdimensionalen Raum gearbeitet, wobei dieser von Vektoren aufgespannt wird, die die besondere Charakteristik der interessierenden Form beschreiben [16]. Diese Vergleichsformen werden dabei initial eingelernt. Einige Methoden der 3D-Objekterkennung basieren dabei auf mehreren räumlichen Ansichten der zu lokalisierenden Objekte. Die Charakteristikvektoren werden dazu über das Aussehen der Form in Bildern, den sogenannten Eigen-Bildern, definiert. Weitet man diesen Ansatz auf 3D-Daten aus, nutzt man Eigen-Flächen, um die Form des interessierenden Objektes zu beschreiben [17].

Einen weiteren Ansatz bieten Support Vector Machines für eine 3D-Mustererkennung [18]. Eine Objektsegmentierung und -erkennung wird von Dey et al. in [19] auch mit approximierten polygonalen Modellen durchgeführt. In vielen Fällen ist es nicht erforderlich, vollständig dreidimensionale Strukturen zu erkennen und zu verarbeiten, sondern es ist ausreichend, die Abbildung eines 3D-Objekts in 2D-Bildern zu erkennen und zu bewerten.

Darüber hinaus existieren Verfahren, welche die Objektlokalisierung in Kameraaufnahmen auf der Basis von CAD-Daten vornehmen. Dabei wird angenommen, dass aus den 3D-Daten

ein Modell erstellt werden kann, das mit den gemessenen und rekonstruierten Geometrien verglichen werden kann. Für Objekte, die vollständig durch Geraden bzw. Kreise beschrieben werden können, eignet sich die klassische Hough-Transformation [20], um diese in Bildern zu finden. Eine Verallgemeinerung stellt die generalisierte Hough-Transformation [21] dar.

#### **I.4.4 Angaben zur verwendeten Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste**

Neben den bekannten Online-Suchdiensten wurde hauptsächlich mit der nachfolgend aufgelisteten Fachliteratur aus dem Bereich der Robotik und Automatisierung gearbeitet. Für durchgeführte Patentrecherchen wurde das Onlineportal DEPATISnet vom Deutschen Patent- und Markenamt genutzt.

- [1] Kier, W. und Smith (1985) "Tongues, Tentacles and Truncs: The biomechanics of movements in muscular hydrostats", *Zoological Journal of the Linnean Society* 83:307-324.
- [2] Kier, W. Stella, M. (2007) "The Arrangement and Function of 'Octopus Arm Musculature and Connective Tissue", *JOURNAL OF MORPHOLOGY* 268:831-843.
- [3] Martin, F. (2003) "Organisationsprinzipien zielgerichteter Bewegungen flexibler Greiforgane Kinematik des Rüssels von 'Loxodonta Africana und des Greifschwanzes von Ateles geoffroyi sowie Seitenpräferenzen des Rüssels von Elephas maximus". Dissertation, Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie der Freien Universität Berlin. <http://www.diss.fu-berlin.de/2004766index.html>.
- [4] Schulte, H.F.J., The characteristics of the McKibben artificial muscle. The application of external power in prosthetics and orthotics, National Academy of Science-National Research Council, Washington D.C., 1961.
- [5] Chou, C.-P. and B. Hannaford, Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles, in IEEE. 1994, Department of Electrical Engineering, FT-10, University of Washington: Seattle, Washington 98195. p. 281-286.
- [6] Caldwell, D.G., G.A. Medrano-Cerda, and M.J. Goodwin, Characteristics and adaptive control of pneumatic muscle actuators for a robotic elbow. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994. 4: p. 3558-3563.
- [7] Caldwell, D.G., G.A. Medrano-Cerda, and M.J. Goodwin, Control of Pneumatic Muscle Actuators. IEEE Control Systems Journal, 1995. 15(1): p. 40-48.
- [8] Chou, C.P. and B. Hannaford, Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996. 12(1): p. 90-102.
- [9] anon., Fluidic Muscle DMSP/MAS  
[https://xdki.festo.com/xdki/data/doc\\_de/PDF/DE/MAS\\_DE.PDF](https://xdki.festo.com/xdki/data/doc_de/PDF/DE/MAS_DE.PDF) 2005, FESTO AG & Co. KG.

- 
- [10] Hildebrandt, A., et al., A Flatness Based Design for Tracking Control of Pneumatic Muscle Actuators. Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2002: p. 1156-1161.
- [11] Hildebrandt, A., et al., Nonlinear Torque and Stiffness Control of 2 D.o.F. Manipulator Driven by Artificial Pneumatic Muscle Actuators. 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004.
- [12] Neumann, R., C. Bretz, and J. Volzer, Ein Positionierantrieb mit hoher Kraft: Positions- und Druckregelung eines künstlichen pneumatischen Muskels, in 4. Internationalen Fluidtechnischen Kolloquium. 2004: Dresden. p. 12.
- [13] Kerscher, T., et al., Evaluation of the Dynamic Model of Fluidic Muscles using Quick-Release. Biomedical Robotics and Biomechanics, BioRob, The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on, 2006: p. 637-642.
- [14] Boblan, I., et al. A Human-like Robot Hand and Arm with Fluidic Muscles: Modelling of a Muscle Driven Joint with an Antagonistic Setup. in 3rd Int. Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines. 2005. Technische Universität Ilmenau, Germany.
- [15] Boblan, I., et al., A Human-like Robot Hand and Arm with Fluidic Muscles: Biologically Inspired Construction and Functionality, in Embodied Artificial Intelligence, F. Iida, et al., Edi-tors. 2004, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. p. 160-179.
- [16] Cyr, C. M. und B. B. Kimia: 3D object recognition using shape similarity-based aspect graph. In: Proc. ICCV 2001, S. 254-261, 2001.
- [17] Kostianen, T., I. Kalliomaeki, T. Tamminen und J. Lampinen: 3D object recognition based on hierarchical eigen shapes and Bayesian inference. In: Casasent, D. P. und E. L. Hall (Hrsg.): Proc. SPIE Intell. Robots and Computer Vision XX: Algorithms, Techn., and Active Vision, Band 4572, S. 165-173, 2001.
- [18] Moreno, A. B., A. Sanchez, J. Velez und J. Diaz: Face Recognition using 3D local geometric features: PCA vs. SVM. In: Proc. 4th Int. Conf. Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), 2005.
- [19] Dey, T. K., J. Giesen und S. Goswami: Shape Segmentation and matching from noisy point clouds. In: ALEXA, M. und S. RUSINKIEWICZ (Hrsg.): Eurographics Sympos. Point-Based Graphics, S. 193-199, 2004.
- [20] Hough, P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns. US Patent Nr.3069654. 1962
- [21] Ballard, D. H.: Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. In: Pattern Recognition 13 (1981), Nr. 2, S. 111-122
- [22] Boas, J. E., & Paulli, S. (1908), "The facial muscles and the proboscis". Jena: Gustav Fischer.
- [23] Mariappa, D. (1986), "Anatomy and histology of the Indian elephant". Oak Park, MI: Indira Publishing House.

- [24] Pritts, M. B. und Rahn, C. R. (2004), Design of an Artificial Muscle Continuum Robot“, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation New Orleans, LA April 2004.
- [25] Gravagne, A. und Walker, D. (2000) “On the kinematics of Remotely-Actuated Continuum Robots”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA April 2000.
- [26] <http://www.tcnj.edu/~rgraham/ron/GreyPilgrimHTI.html>
- [27] [http://www.festo.com/cms/de\\_corp/9655.htm](http://www.festo.com/cms/de_corp/9655.htm)

## I.5 Zusammenarbeit der Projektpartner und anderen Stellen

### I.5.1 Kommunikation, Arbeitskreise, Workshops

Die Projektleitung und -koordinierung des Verbundvorhabens BROMMI wurde vom Fraunhofer IFF durchgeführt. Die Definition der Anforderungen für die einzelnen Teilsysteme erfolgte im Rahmen von Arbeitskreisen, an denen die jeweiligen Entwickler beteiligt waren.

Zum Abschluss jedes Meilensteins, mindestens aber halbjährlich, fanden interne Workshops mit allen geförderten Projektbeteiligten statt, auf dem die Ergebnisse der Teilprojekte vorgestellt und weitere Maßnahmen diskutiert worden sind.

Datum	Veranstaltung	Veranstaltungsort
20.04.2009	Kick-Off	Fraunhofer IFF
12.06.2009	Projekttreffen	Fraunhofer IFF
09.09.2009	Projekttreffen	TU Berlin
02.10.2009	Projekttreffen	TU Berlin
26.10.2009	Nachhaltigkeits-Workshop	UMSICHT – Oberhausen
16.11.2009	Projekttreffen	IFA – St. Augustin
18.11.2009	Projekttreffen	Fraunhofer IFF
24.11.2009	Arbeitstreffen	Festo AG – Esslingen
08.02.2010	Projekttreffen	DLR – Köln
16.02.2010	Arbeitstreffen	Festo AG – Esslingen
24.02.2010	Projekttreffen	Fraunhofer IFF
25.02.2010	Workshop	ELAN Bielefeld
10./11.03.2010	Statustagung	BIONA – Berlin
17.03.2010	Arbeitstreffen	Fraunhofer IFF
18.04.2010	Ausstellung	HMI 2010
26.04.2010	Arbeitstreffen	Fraunhofer IFF



22.06.2010	Projekttreffen	Festo AG – Ostfildern
28.10.2010	Meilensteintreffen	Fraunhofer IFF
17.01.2011	Arbeitstreffen	Festo AG – Esslingen
16.03.2011	Statustagung	BIONA – Berlin
06.04.2011	Posterpräsentation	HMI 2011
07.06.2011	Nachhaltigkeits-Workshop	UMSICHT – Oberhausen
27.09.2011	Arbeitstreffen „BionikInABox“	Folkwang Uni. - Essen
06.10.2011	Meilensteintreffen	TU Berlin
29.05.2012	Präsentation TAK	TU Berlin
30.08.2012	Abschlusstreffen	Fraunhofer IFF

Tabelle 3: Projekttreffen, Meilensteintreffen, Workshops und Tagungen

Zum Projektende wurden die Ergebnisse, einschließlich die praktische Vorführung der beiden Demonstratoren SMK und TAK in Verbindung mit der 3D-Objekterkennung, auf einer Abschlusspräsentation im Fraunhofer IFF in Anwesenheit aller geförderten Verbundpartner und dem Projektträger DLR vorgestellt.

### **I.5.2 Koordination und Projektcontrolling**

Die Projektkoordination wurde vom Fraunhofer IFF übernommen. Bei Änderungen in der Projektschwerpunktsetzung wurde der Projektträger informiert und die weitere Vorgehensweise mit ihm abgestimmt. Die Federführung für die beiden Demonstratoren TAK und SMK lagen jeweils bei der TUB (TAK) und dem IFF (SMK).

Im Rahmen der durchgeführten Projekttreffen und Statusseminare wurden die Projektergebnisse vorgestellt, im Detail diskutiert und bewertet. Der Projektträger, vertreten durch Herrn Keil, nahm an den Meilensteintreffen und am Abschlusstreffen teil.

Das finanzielle Controlling richtete sich nach den Vorgaben des Zuwendungsgebers. Für das Fraunhofer IFF und die Universität erfolgte dieses durch die jeweiligen zentralen Institutionen.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

#### **II.1.1 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens**

Ziel des BROMMI-Projektes war die Entwicklung zweier sicherer Manipulatorkinematiken nach biologischem Vorbild, die eine mit nachgiebigen fluidischen Muskeln und die andere als

mechatronische Lösung mit Elektromotoren ausgestattet, die gefahrlos mit dem Menschen in einem gemeinsamen Arbeitsraum agieren kann. Die Kinematik soll die Sicherheitsanforderungen erfüllen, so dass sie für den Einsatz im Heim- oder Laborbereich wie auch für industrielle Anwendungen ohne zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen einsetzbar ist.

Gegenüber den Knickarmrobotern, die auf ihre maximale Tragkraft, hohe Steifigkeit und hohe Geschwindigkeit ausgelegt sind, hat die Umsetzung der Roboterarme nach biologischem Vorbild eine Verbesserung des Masse/Leistungsverhältnisses zur Folge. Der vorgestellte neue Ansatz sicherer Manipulatoren macht nicht nur die kostspieligen Schutzrichtungen überflüssig, sondern eröffnet zugleich neue Märkte für Roboteranwendungen.

Zukünftig soll die Rüsselkinematik nicht nur ortsfest, sondern auch als Werkzeug auf mobilen Robotern Anwendung finden. So können vielfältige Manipulatoraufgaben mittels der neuen, eigensicheren Roboterkinematik übernommen werden. Es ergeben sich vielfältigste Anwendungsmöglichkeiten in Bereichen, in denen mobile Roboter bzw. mobile Assistenzsysteme mit Menschen interagieren sollen.

Zu Projektbeginn wurde einvernehmlich vereinbart, unterschiedlichste Konzepte zu entwickeln und ggf. auch verschiedene Versuchsaufbauten zu erstellen. Es wurde auch diskutiert, ggf. verschiedene Kinematikkonzepte zu einer Hybridlösung zusammenzufassen. Innerhalb der ersten neun Projektmonate wurden daraufhin eine Vielzahl an Konzepten für Rüsselkinematiken entwickelt und auf ihre Eigenschaften, Vor- und Nachteile sowie die anwendungsnahe Einsetzbarkeit untersucht.

Wie im Zwischenbericht 2009 dargelegt, favorisierten die TU Berlin und das Fraunhofer IFF zwei Konzepte und Demonstratoren zur Umsetzung. Eine Kinematik ist die „Tripedale Alternanzkaskade“ (i.F. TAK) der TUB, die ausschließlich pneumatisch angetrieben wird. Die andere Kinematik ist die „Serielle Modularkinematik“ (i.F. SMK) des IFF, die aus elektrisch angetriebenen Multigelenken aufgebaut ist.

Es bestand bei allen beteiligten Verbundpartnern Einigkeit darüber, dass beide Demonstratoren im Rahmen des BROMMI-Projektes entwickelt und aufgebaut werden sollen.

Die zentrale Zielsetzung des Verbundvorhabens BROMMI hinsichtlich der Entwicklung von bionischen Rüsselkinematiken für sichere Roboteranwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion wurde grundsätzlich beibehalten und lediglich um die Entwicklung und den Aufbau von zwei Demonstratoren, die bis zum Projektende funktionsfähig aufgebaut worden sind, erweitert. Für beide Demonstratoren wurde eine identische Bildverarbeitung entwickelt. Es musste lediglich die Schnittstelle zum jeweiligen Demonstrator abgestimmt sowie zwei Kamerasysteme aufgebaut und kalibriert werden.

Im Folgenden werden die Vorhabenziele für die beiden Demonstratoren vorgestellt.

#### **II.1.1.1 Fraunhofer IFF**

Die Rüsselkinematik SMK wurde analog zum Elefantenrüssel hängend an einem Portal angebracht. Der Zielgegenstand kann im Arbeitsraum frei positioniert werden. Eine Erfassung der Position erfolgt über eine Objekterkennung mit Kameras, die ebenfalls am Portal angebracht sind. Sobald die Rüsselkinematik das Zielobjekt erreicht und

aufgenommen hat, kann dieses an einem bestimmten Ort im Arbeitsraum abgelegt werden. Die Bewegung der Rüsselkinematik konnte bei Projektabschluss nicht alle möglichen Bewegungen erlauben, welche die hochbewegliche Kinematik ausführen könnte. Ursachen dafür sind insbesondere die Laufzeit des Projektes und die verfügbaren Personalkapazitäten. Die Umsetzung aller möglichen Funktionen der SMK, wie die adaptive Anpassung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Position der Rüsselkinematik und den wirkenden äußeren Kräften, konnte bis zum Projektende nicht umgesetzt werden.

Die Rüsselkinematik wurde auf der Basis einer Verkettung von fünf, unterschiedlich skalierten Multigelenke aufgebaut. Hierbei handelt es sich um ein Gelenk, welches in der Lage ist eine Flexions- und eine Schubbewegung gleichermaßen auszuführen. Eine Flexionsbewegung ist als eine Überlagerung von zwei orthogonalen Drehbewegungen zu verstehen. Angetrieben wird das Multigelenk mit drei elektrischen Antrieben. Die Länge der aufzubauenden Seriellen Modularkinematik beträgt ca. 1,0 m. Der maximale Hub (Verkürzung) eines einzelnen Multigelenks liegt bei ca. 30% der gestreckten Länge eines Gelenks. Der maximale Neigungswinkel eines Multigelenks ist abhängig von der konstruktiven Größe und beträgt bei den am Demonstrator eingesetzten Modulen zwischen 20 und 40°.

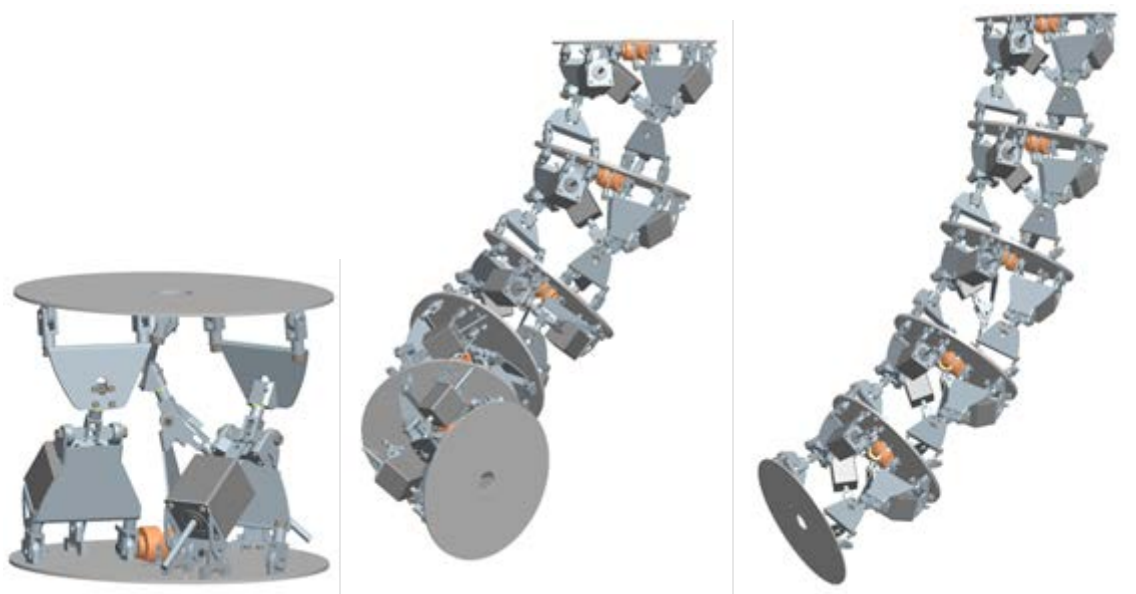


Abbildung 2: Multigelenk (links), Serielle Modularkinematik (Mitte, Freiform) und Serielle Modularkinematik (rechts, Bogenform)

Die Bewegung um jede Achse wird über drei Motoren eingestellt und kann kombiniert werden. Dies ermöglicht der SMK eine hohe Beweglichkeit, Längenänderung und die Ausführung komplexer Bewegungen. Dargestellt ist nachfolgend eine CAD-Skizze eines Multigelenks und der SMK, siehe Abbildung 2. Durch den mechanisch steifen Aufbau sowie der hochpräzisen Antriebstechnik wird eine hohe Positioniergenauigkeit erreicht. Für das sichere Greifen ist am freien Ende der SMK ein adaptiver Greifer (FinGripper) integriert worden, der pneumatisch betätigt wird.

Es wurde eine Steuerung aus Leit- und Embedded-Rechner zur Positionierung der Rüsselkinematik im Arbeitsraum entwickelt. Der Leitrechner führt die Berechnung aller

Sollwerte aus, nimmt Sensordaten auf und bewegt auf deren Grundlage ein virtuelles Modell, realisiert die Differenzsteuerung mit den Ergebnissen aus der Bildverarbeitung und plant so die Bewegungs- und Greifvorgänge. Es lassen sich Pick-and Place-Aufgaben durchführen, die eine gezielte Aufnahme und Ablage eines Objektes bekannter Form und Größe in einem definierten Arbeitsraum von 500 x 500 x 300mm (B x L x H) beinhaltet. Das Objekt wird zuvor von der Bildverarbeitung als Zielobjekt erkannt und mit einer Positioniergenauigkeit von +/- 2,0 mm gehandhabt.

### II.1.1.2 Technische Universität Berlin

Die von der TU Berlin realisierte Tripedale Alternanzkaskade (TAK) stellt eine bionische Umsetzung des Elefantenrüssels dar. Die rein pneumatisch angetriebene Kinematik, besteht aus mehreren gleichartig aufgebauten Segmenten zuzüglich eines Kopfsegmentes und eines Greifersegmentes. Jeder Rüsselabschnitt kann je nach Position in der TAK auf Bewegungsradius oder Kraftentwicklung optimiert werden. Es werden alle 3 sich derzeit auf dem Markt befindenden Muskeltypen DMSP-10/20/40 verbaut. Sie sind spezifisch ihrer Vor- und Nachteile in der Kinematik verbaut und demonstrieren die Skalierbarkeit der TAK.



Abbildung 3: Tripedale Alternanzkaskade; gesamte Rüsselkinematik (links), zwei ineinander kaskadierte Segmente (mitte), Endsegment mit Greifer (rechts)

Zu einem Rüsselsegment gehören drei symmetrisch leicht kegelförmig angeordnete Muskeln gleichen Typs und gleicher Länge, die jeweils an den Enden über zwei dreischenkligte Sterne miteinander verbunden sind. Beide Sterne werden mittig durch einen zentralen Druckstab auf Abstand gehalten und über die drei Muskeln verspannt, Abbildung 4 mitte. Durch unsymmetrische Kontraktion der Muskeln werden die beiden Sternenebenen in zwei Dimensionen um ein Wellengelenk im Druckstab gekippt. Die geometrische Auslegung der Stern-Druckstab Verbindung erlaubt die Unterbringung aller Servicekomponenten wie Ventile, Elektronik, Sensorik etc. in den entstehenden Freiräumen. Die konsequente

Ineinanderkaskadierung der einzelnen Segmente hilft das begrenzte Längen-Kontraktions Verhältnis der verwendeten Muskeln zu kompensieren.

Als Greifer findet eine, auf Leichtbau ausgelegte und von Festo zur Verfügung gestellte, lasergesinterte 3D-FinRay Struktur Verwendung, Abbildung 4 rechts, die Objekte formschlüssig greifen und manipulieren kann.

Die in Analogie zum Elefantenkopf entwickelte Basis Abbildung 4 links dient als Aufhängung und Arbeitsraumerweiterung. Sie besteht aus 2 separat antagonistisch gesteuerten Gelenken. Entsprechend der auftretenden Hebelkräfte, finden hier die größten Muskeln Verwendung, die eine Hebe- und Drehachse realisieren. Dadurch erweitert sich der Arbeitsraum in der Höhe und erhält einen torusförmigen Charakter mit der Basis als Mittelpunkt. Die entstehenden Freiräume beherbergen den Steuerrechner, 220V Elektronik und ein Druckluftreservoir.

Im Vordergrund stand eine Kinematik nach dem Vorbild eines Elefantenrüssels, die mit dem Menschen in seinem Lebensraum interagieren kann. Die bewegungsphysikalischen Anforderungen an z.B. Position und Geschwindigkeit, die Menschen im Umgang miteinander – Mensch-Mensch-Interaktion – erwarten, werden von der TAK größtenteils erfüllt. Um sich möglichst unauffällig und situationsintuitiv an den menschlichen Lebensraum anzupassen, bewegt sich die TAK nicht schneller und kraftvoller als der Mensch und verhält sich nachgiebiger, also gefähigungsärmer, in der nicht vermeidbaren Kollision als herkömmliche Kinematiken. Zusätzlich kann sie aber verlässlicher als der Mensch mit der Umgebung interagieren. Mit diesen Eigenschaften ist die TAK in der Lage, im Schnittbereich zwischen menschlicher Sicherheit und maschineller Präzision zu arbeiten.

BROMMI:TAK ist mobil und benötigt durch die integrierte Druckluftflasche lediglich einen normal abgesicherten (10A) 220V-Anschluß. Weitere externe Gerätschaften wie Leitrechner und externe Spannungsversorgung werden nicht benötigt.

BROMMI:TAK kann über eine Bildverarbeitung in dem im Projekt definierten Arbeitsraum von 500 x 500 x 300mm (B x L x H) seinen Greifer und Objekte erkennen und positionieren. Die TAK kann aber über das Kopfsegment und den ca. 2m langen Rüssel einen wesentlich größeren Arbeitsraum durchfahren und dort Objekte manipulieren. Es können Objekte außerhalb des definierten Arbeitsraumes vom bedienenden Menschen genommen und über die BV im definierten Arbeitsraum abgelegt werden und umgekehrt. BROMMI:TAK ist in der Lage durch seine hyperredundante Kinematik die Objekte im definierten Arbeitsraum von unterschiedlichen Richtungen (Orientierungen) zu greifen und wieder zu positionieren. So kann die beste Greifposition ausgesucht werden.

### **II.1.1.3 [project:syntropy] GmbH**

Die visuelle Erkennung und Lokalisierung von Greifer (TCP) und Zielobjekt im Arbeitsraum wird über 5 IR Kameras und 4 Grauwertkameras ermöglicht. Alle Kameras sind am Portal des Demonstrators befestigt. Die Anordnung der Kameras erfolgte um den Arbeitsraum so herum, dass eine optimale Erfassung des gesamten Arbeitsraumes gewährleistet ist. Die Positionen der Kameras sind, bezogen auf das Weltkoordinatensystem, bekannt.

Der Greifer des Manipulators wurde mit mehreren Markern ausgestattet, die zu einem Markerobjekt logisch zusammengefasst worden sind. Die Berechnung der Ist-Position dieses Markerobjektes im Arbeitsraum erfolgte anhand der Bilder der IR Kameras und den bekannten Kamerapositionen im Weltkoordinatensystem. An den Leitreechner des jeweiligen Demonstrators wird ein kontinuierlicher Datenstrom gesendet, der die Ist-Position des Greifers im Arbeitsraum beinhaltet. Eine Feinpositionierung ist auf Grundlage dieser Ist-Positionen möglich.

Die Erkennung der zu greifenden Objekte wird durch eine Lokalisierungsanforderung der Robotersteuerung ausgelöst. Daraufhin erfolgen die Bildaufnahme und die anschließende Berechnung der Position des zu greifenden Objektes. Abschließend wird die Position des Objektmittelpunktes an die Robotersteuerung transferiert.

Das gesamte visuelle System, bestehend aus Kameras und Bildverarbeitung, ist skalierbar und für beide Demonstratoren einsetzbar. Das Kamerasystem muss für jeden Demonstrator getrennt kalibriert werden. Auf einem zusätzlichen PC wird die Lage des Objektes in einem 3D-Modell des Arbeitsraumes dargestellt.

## **II.1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

Am 30. August 2012 fand im Fraunhofer IFF Magdeburg das Abschlusstreffen und die Präsentation der erreichten Ergebnisse im Verbundvorhaben BROMMI statt, die in den nachfolgenden Abschnitten für jedes Teilprojekt dargestellt werden.

### **II.1.2.1 Fraunhofer IFF**

#### **Inverse Kinematik der SMK**

Aufgrund der hohen Anzahl redundanter Freiheitsgrade konnte für die Berechnung der inversen Kinematik kein etablierter Lösungsansatz aus der Robotik angewendet werden. Aus diesen Gründen wurde für die SMK ein neuer und speziell zugeschnittener Ansatz zur Lösung der inversen Kinematik entwickelt, berechnet und getestet. Entgegen anderer Ansätze wird ein Großteil der durchgeführten Berechnungen auf analytischer Grundlage abgewickelt, wodurch eine schnelle Generierung von Ergebnissen möglich ist. Im gesamten Ablauf muss nur eine nichtlineare Gleichung numerisch gelöst werden.

Die Modellierung der Multigelenke war inhaltlicher Schwerpunkt einer IEEE<sup>1)</sup>-Veröffentlichung und eines Vortrags auf der ICRA<sup>2)</sup> 2011 in Shanghai. Weiterhin wurde das BROMMI-Projekt auf der Fachtagung „Sichere Mensch-Roboter-Interaktion“ der 14. IFF-Wissenschaftstage 2011 im Rahmen eines Vortrags vorgestellt, der auch dort beim Fachpublikum auf großes Interesse stieß. Der Lösungsansatz für die inverse Kinematik der SMK wurde zudem auf den Magdeburger Maschinenbautagen 2011 MMT im Rahmen eines Vortrags und einer Veröffentlichung vorgestellt.

### *Konstruktive Optimierung der Antriebe*

Die Multigelenke der SMK werden mit Elektromotoren {1} angetrieben, deren rotatorische Bewegung über eine Spindel {5} in eine Schubbewegung umgeformt wird. Jede Spindel ist mit einem Klappmechanismus {6} verbunden, der durch die Verschiebung der Spindel verstellt wird, was schließlich zur Bewegung des Gelenks führt.

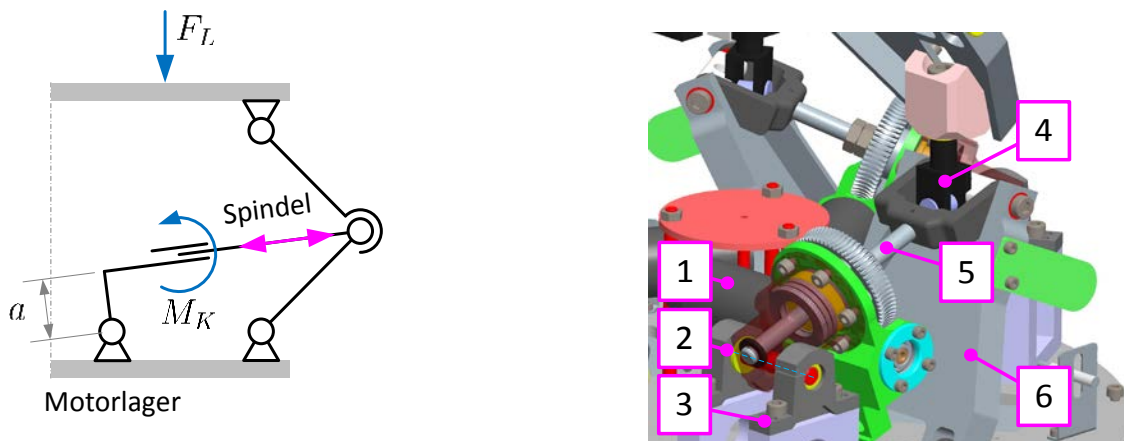


Abbildung 4: Schematisches Spindelgetriebe und Motorlager

Jede Spindel erzeugt bei Belastung des Gelenks ein hohes Kippmoment  $M_K$  in der Mutter, in der sie gelagert ist. In Abbildung 4 ist dieser Effekt schematisch dargestellt. Das Kippmoment verursacht hierbei hohe Reibverluste und kann in Extremfällen zu einer Verklemmung der Spindel führen. Es wurde untersucht, wie eine Kompensation von  $M_K$  erreicht werden kann. Dies ist möglich, wenn die Bewegungsachse der Spindel die Schwenkachse der Motorlagerung {2} schneidet. Dieses Optimierungspotential wurde für die Gelenke der mittleren und höchsten Skalierungsstufe umgesetzt und erfolgreich getestet.

<sup>1</sup> Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>2</sup> Internal Conference on Robotics and Automation, May 9-13, 2011, Shanghai, China

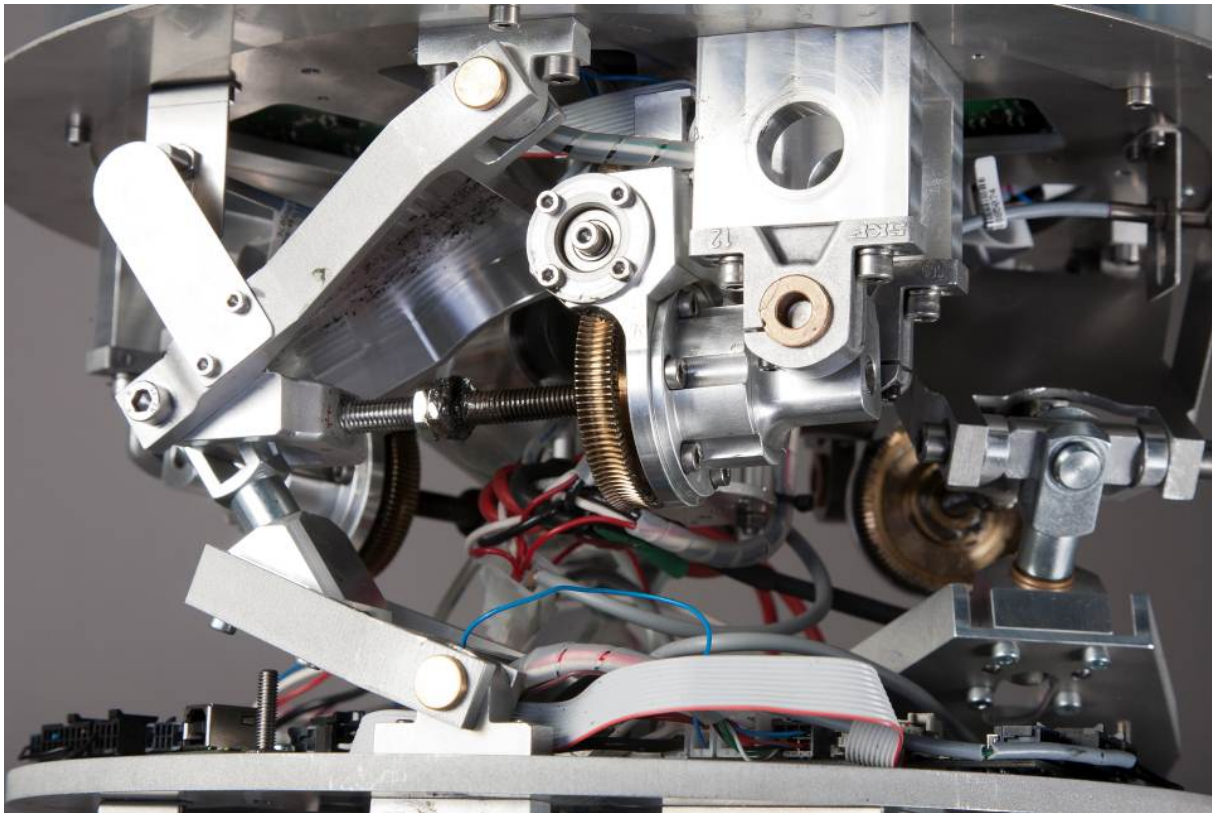


Abbildung 5: Konstruktion Multigelenk (Foto: IFF)

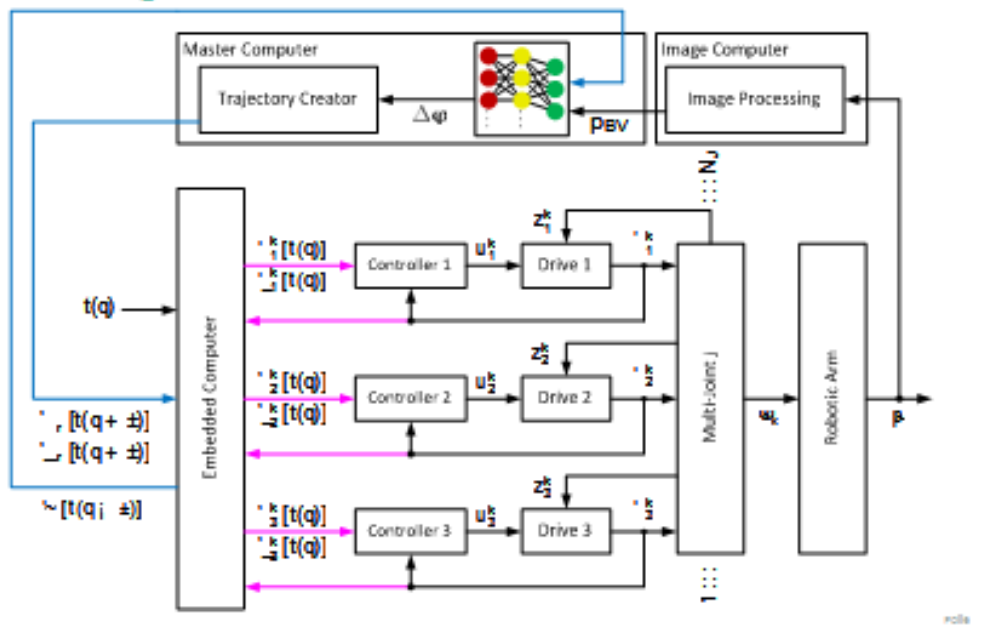
#### *Integration der MATLAB-Berechnungen in die Software der Hauptsteuerung*

Alle Berechnungen, die von der Hauptsteuerung ausgeführt werden, wurden durchweg in MATLAB-Funktionen ausgelagert. Hierfür wurde ein Kompilierungsprozess entwickelt, der die Einbindung und Verwendung der in MATLAB implementierten Berechnungsfunktionen in die Software der Hauptsteuerung ermöglicht. Durch diesen Schritt sind die leistungsfähigen und erprobten Standard-Lösungsalgorithmen von MATLAB in der Hauptsteuerung nutzbar, was die Berechnung von Trajektorien beschleunigt und das Aufkommen zusätzlicher Implementierungsfehler effektiv verhindert.

Zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit wurde eine sogenannte Neuronale Vorsteuerung entwickelt und auf die Steuerungssoftware aufgesetzt. Die Trajektorien der SMK werden kontinuierlich aktualisiert. Die Aktualisierung erfolgt durch die Berechnung von Korrekturpositionen, die aus der Erfassung der Position des TCP und der IST-Position aller Motorregler der SMK kontinuierlich generiert werden.



## Steuerung und Regelung Umsetzung



© Fraunhofer IFF, Magdeburg 2012

Fraunhofer  
IFF

Abbildung 6: Prinzipschema Bionische Vorsteuerung (Grafik: Fraunhofer IFF)

Der Demonstrator SMK hat durch den Einsatz hochbeweglicher Multigelenke vergleichbare Bewegungseigenschaften wie der Rüssel eines Elefanten. Die Gesamtkinematik weist durch den Einsatz von Multigelenken keine gegenläufigen Bewegungen und keine Klemmstellen auf, womit zur Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Interaktion wesentlich beigetragen wird. Durch die Verwendung von elektrischen Antrieben wird die Positioniergenauigkeit, Lärmunterdrückung und Energieeffizienz gegenüber pneumatischen Antrieben entscheidend verbessert. Weiterhin ermöglicht der Aufbau aus Multigelenken eine vielfältige Skalierung der SMK für verschiedene Anwendungsfelder sowie eine flexible Anzahl der einzelnen Multigelenke und somit der Beweglichkeit der Kinematik. Diese Punkte sind hinsichtlich einer nachhaltigen ökonomischen Verwendung von zentraler Bedeutung.

Die charakteristischen Muskelgruppen eines Elefantenrüssels wurden bei der SMK technisch nicht nachgebildet. Die Entscheidung für den Aufbau der SMK wurde getroffen, da die Entwicklung einer hochbeweglichen, in Bezug auf die Mensch-Roboter-Interaktion sicheren Kinematik sowie die industrielle, wirtschaftliche und vielseitige Verwendbarkeit im unmittelbaren Vordergrund des Projekts standen.

Folgende Ziele wurden mit der Entwicklung und dem Aufbau der SMK im Einzelnen erfüllt:

- Nachhaltigkeit
  - Ökologisch: konsequente Leichtbauweise, ressourcensparend
  - Ökonomisch: Einsatz elektrischer Motoren mit einem hohen Wirkungsgrad, hohe Positioniergenauigkeit, großer Arbeitsraum, Skalierbarkeit, hochmodularer und flexibler Aufbau gemäß der spezifischen Anforderungen
  - Sozial: neue Robotikkomponente, die die sichere Mensch-Roboter-Interaktion ermöglicht, Entlastung der menschlichen Arbeitskraft
  - Bionik: hohe Beweglichkeit, Bewegungsmuster nach Vorbild des Elefantenrüssels
- Sicherheit
  - Leichtbauweise
  - keine gegenläufigen Bewegungen
  - keine Klemmstellen
  - nachgiebige Verbindung an ausgewählten Multigelenken



Abbildung 7: Serielle Modulkonkinematik (SMK) mit fünf Gelenken und adaptiven FinGripper (Foto: IFF)



Für das SMK wurde eine neuartige Verkleidung konzipiert und entwickelt, die sehr leicht und hochflexibel ist. Diese Materialeigenschaften stellen sicher, dass keine zusätzlichen Kräfte auf die serielle Modulkonkinematik wirken und diese hinsichtlich Energieverbrauch und Positioniergenauigkeit beeinflussen.

### II.1.2.2 TU Berlin

Die Fokussierung auf sicheren Leichtbau in Form von Sandwich-Bauweise und später in Form von Kohlefaser verstärktem Stahl armierten Kunststoff (Stahlkunststoff) ist völlig neu in der Robotik. Sie erlauben die Herstellung im Rapid Prototyp Verfahren (additive Herstellungsverfahren wie SLS) und bieten so schnellere und billigere Entwicklungszyklen als herkömmliche abtragende Herstellungsverfahren.

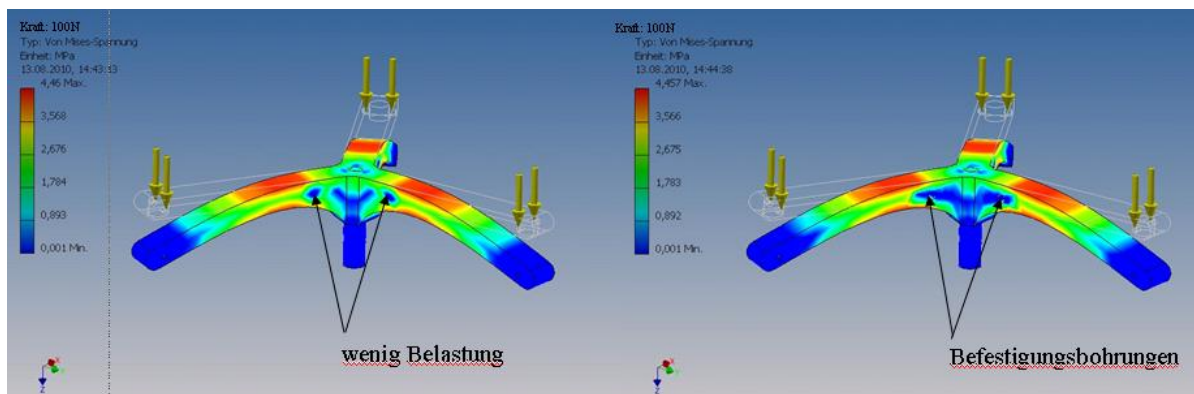


Abbildung 8: Kraftbelastung des dreiarmligen großen Sterns (Grafik: TU Berlin)

Es entstehen Bereiche hoher und geringer Belastung. Bereiche hoher Belastung müssen verstärkt werden, z.B. durch Kohlefaserzugband, und Bereiche geringer Belastung können entfernt bzw. z.B. für Befestigungsbohrungen verwendet werden.

Der konsequente Einsatz von pneumatischen Aktoren, hier speziell fluidische Muskeln der Firma Festo, die ihre positiven Eigenschaften auf die gesamte Kinematik übertragen, erzeugt eine inhärente Nachgiebigkeit. Durch diese immanente Weichheit und Elastizität kann von außen angreifenden Kräften passiv nachgegeben werden, so dass Kontaktverletzungen nahezu ausgeschlossen werden können. Ist die TAK aktiv, kann ihre Steifigkeit segmentweise situationsabhängig eingestellt und nachgeführt werden. Es findet eine Vereinheitlichung von Antrieb und Dämpfung statt. Der Wegfall von Motoren und deren Getriebe als Gewichts- und Fehlerquelle, sowie die Reduktion von Lagern erhöhen die Eigensicherheit und die Fähigkeit im Fehlerfall (z.B. bei Stromausfall) die Position selbstkonservierend zu halten.

Für die Nutzerinteraktion sind primär die außen liegenden pneumatischen Muskeln sichtbar, die über ihre matt schwarze Chloropren-Membran direkt als Puffer agieren und gleichzeitig visuell Akzeptanz und Benutzerfreundlichkeit vermittelt. Den ungewollten Kontakt – die Kollision – positiv zu gestalten, ist größtenteils gelungen. Das Szenario einer einfachen Pick-and-Place Aufgabe, gemäß der Vorhabenbeschreibung, ist, genauso wie das Greifen eines Objektes aus der ruhenden menschlichen Hand, möglich. Letzteres spiegelt das ursprüngliche Ziel der direkten Mensch-Roboter Interaktion wieder und zeigt die Vorteile und Eigenschaften der entwickelten BROMMI:TAK.

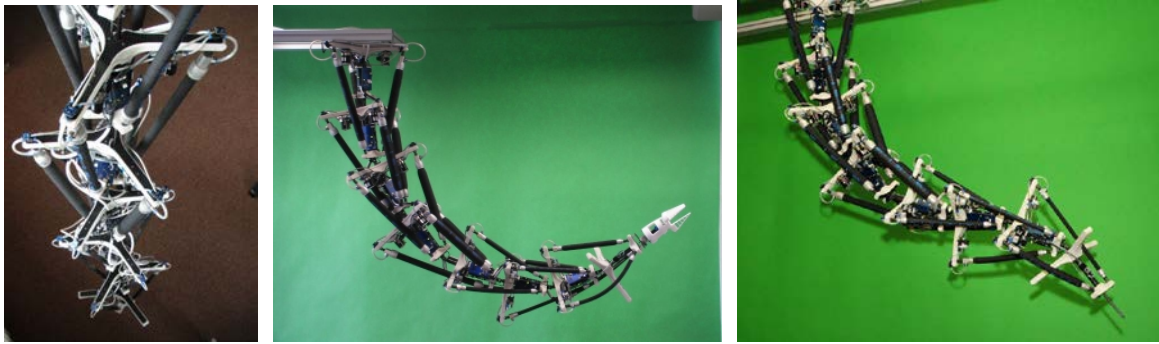


Abbildung 9: Tripedale Alternanzkaskade (TAK) in unterschiedlichen Posen (Foto: TU Berlin)

Die Anordnung der nachgiebigen Muskeln ähnelt der Krümmungsmuskulatur des Elefantenrüssels. Die Einfachheit des Zugaktors und die direkte Kraftumsetzung ohne Übertragung ist Grundlage der einfachen und leichten Konstruktion. Somit steht die TAK nicht nur für Sicherheit und Nachgiebigkeit sondern auch für bionische Umsetzung, einfachen Aufbau und Leichtbau. Dies erhöht nicht nur die Eigensicherheit und reduziert den Regelungsaufwand, sondern spart letztendlich auch Ressourcen ein. Ansprüche an die Genauigkeit und Geschwindigkeit sind an das Aufgabenfeld angepasst, um unnötigen Aufwand zu vermeiden. Darüber hinaus ist das biologische Vorbild um die Eigenschaften Modularität und Skalierbarkeit erweitert worden, um so den vielfältigen Ansprüchen in der direkten Umgebung des Menschen gerecht zu werden.

Die dezentrale Steuerung des hyperredundanten Roboterarms mit 2 Freiheitsgraden pro Segment ist wissenschaftliches Neuland, speziell unter dem Gesichtspunkt einer geteilten Regelung zwischen Zentraleitstelle mit Bahnplanungsvorgaben und lokaler Regelung. Zur Kommunikation zwischen den dezentralen Steuerungseinheiten dienen zwei serielle Bussysteme, von denen eines in warmer Redundanz läuft. Hinzu kommt ein separates Kommunikationsnetz, mit dem ein Segment mit seinen jeweiligen Nachbarn direkt kommunizieren kann. Dieses zweite, auch redundant ausgelegte Netz ist aufgrund eigener Rechenkapazitäten in der Lage aktive und passive Reizweiterleitung abzubilden. Das jeweilige Verhalten wird derzeit untersucht und ggf. in BROMMI:TAK implementiert, um Reflex und Fehlerüberbrückung abbilden zu können.

BROMMI:TAK hat in der jetzigen Ausbaustufe 18 Freiheitsgrade und besteht aus den Teilen:

- Kopfsegment bestehend aus:
  - Drehgelenk: 2x Muskelaktoren DMSP-40 (Fa. Festo), 2x Proportionalventilen MPYE (Fa. Festo), 3x Drucksensoren und 1x Winkelsensor
  - Hebergelenk: 4x Muskelaktoren DMSP-40 (Fa. Festo), 2x Proportionalventilen MPYE (Fa. Festo), 3x Drucksensoren und 1x Winkelsensor
- Rüssel bestehend aus:
  - 4 Segmenten jeweils aus: 3x Muskelaktoren DMSP-20 (Fa. Festo), 6x Proportionalventilen PVQ (Fa. SMC), 4x Drucksensoren und 2x Winkelsensoren
  - 3 Segmenten jeweils aus: 3x Muskelaktoren DMAP-10 (Fa. Festo), 6x Schaltventilen MH1 (Fa. Festo), 4x Drucksensoren und 2x Winkelsensoren
- Greifersegment bestehend aus:
  - Drehgelenk: 1x pneumatischer Dreher DSM (Fa. Festo), 2x Schaltventilen MH1 (Fa. Festo), 1x Drucksensor und 1x Winkelsensor
  - Greifer: 1x pneumatischer FinRay Greifer DHDG (Fa. Festo), 2x Schaltventilen MH1 (Fa. Festo) und 1x Drucksensor



Abbildung 10: Tripedale Alternanzkaskade (TAK) mit einem Kopfsegment aus 2 Gelenken, 7 gleichartigen Segmente à 2 Gelenken und einem Greifersegment mit FinRay-Greifer (Foto: TU Berlin)

Durch die konsequente Modulbauweise des Rüssels und dessen Segmente können aktuell bis zu 12 Segmente unterschiedlicher Größe aneinandergereiht werden, die gemeinsam dann eine Gesamtkrümmung von bis zu 180° realisieren können.

Folgende konkrete Ergebnisse in den Bereichen Mechanik, Elektronik, Mikrokontroller-Software, kinematische Berechnung, Regelung und Software liegen vor:

Mechanik:

- Konsequenter Leichtbau durch additive Herstellung (SLS) tragender Teile

- Stabilität durch Trennung von Funktions- und Volumenkomponenten, deren Optimierung und Realisierung in einem Verbundmaterial (Sandwich, Stahlkunststoff)
- Kaskadierte Anordnung für besseres Verhältnis von Winkelausbeute zu Gesamtlänge
- Tripedale Muskelanordnung für 2 Gelenkachsen zur Gewichtseinsparung
- Vorgehaltene Bauräume für Elektronik (Mikrocontroller, Treiber, Ventile, Sensorik)

#### Elektronik:

- komplett getrennter Datenverarbeitungs- und Leistungsstrompfad
- Ansteuerungen für 3 Ventiltypen (MPYE, PVQ, MH1) integriert sowie für Piezoventile vorhanden; Niederspannungssystem
- autark operierende Segmente mit jeweils 2 Mikroprozessorkernen für Befehlsausführung und Überwachung (je 72 MIPS) und sehr hoher Portauslastung (>90%)
- redundanter Steuerbus; redundante Von-Neumann-Nachbarschaft-Kommunikation (- integrierte Spannungswandlung/Sensordatenaufbereitung und galvanische Trennung der Ventilansteuerung)
- 17 präzise, berührungslose, digitale Winkelsensoren; Auflösung <0,03 Grad (direkte Anbindung an das jeweilige Segment)
- 29 schnelle, analoge Drucksensoren (direkte Anbindung an das jeweilige Segment)

#### Mikrocontroller-Software:

- frei programmierbar via JTag-Schnittstelle
- hartes Echtzeitbetriebssystem
- Kernel-/Userspace-Trennung
- parallele Sensorauswertung
- 6 PWM Kanäle  $\hat{=}$  1kHz bei 10us Auflösung

#### Kinematische Berechnung:

- Berechnung der Vorwärtskinematik über DH-Matrizen in Matlab
- Spezielle Rückwärtsrechnung als (halb-)geschlossene Lösung bestehend aus Approximation der Rüsseleingelenke, geometrische Rückwärtsrechnung und Aufteilung auf die Einzelwinkel nach speziellen Verteilungsschlüsseln (Optimierung nach Energie, Homogenität u.a.) in Matlab
- Komplette kinematische Rechnung bestehend Rückwärtsrechnung und einer verifizierenden Vorwärtsrechnung in Matlab (dann Kompilierung zu einem eigenen Prozess) dauert ca. 0,08 Sekunden

#### Regelung:

- Ausgiebige Modellbildung (Druckluftquelle, Leitung, Ventil-Thermodynamik, Ventil-Blendendynamik, Muskel-Thermodynamik, Muskel-Elastomechanik, Muskel-Geometrie und kinematische Kopplung)
- Robuste Regelung für prototypischen Dauerbetrieb und zum Ausgleich von System- und Bauteiltoleranzen
- Einsatz praxisrelevanter Techniken in der Simulation und im Prototyp (Störfilter, Set Point Weighting, Anti-Windup, Ventil-Totzonenkompensation) für robusten Einsatz

- Implementierung biologischer Steuerungen und Regelungen (Kokontraktion, Vorspannung, lokale/dezentrale Regler, Reflexe)

Steuerungssoftware/GUI:

- Client-Server Architektur als eine voneinander unabhängige Entwicklung und Erweiterung
- Einsatz von Java auf dem Client als plattformunabhängige Sprache für Endgeräte zur Bedienung und graphischen Ausgabe (GUI)
- Einsatz von Remote Method Invocation (RMI) als eine plattformunabhängige Schnittstelle zwischen Client- und Server-Applikation
- Einsatz von Java Native Interface (JNI) als Schnittstelle zwischen dem in Java kodierten RMI-Server und der in C/C++ kodierten Steuerungssoftware des CAN-Bus Interfaces

Folgende Szenarien können ausgeführt werden:

- Anfahren von vorgegebenen Winkelsätzen (kinematische Vorwärtsrechnung) und TCP-Positionen (kinematische Rückwärtsrechnung)
- Anfahren von Positionen mit verschiedenen Güten (schnell, langsam, genau etc.) im definierten Arbeitsraum und weit darüber hinaus
- Durchfahren von Sollbahnen (dynamisches Greifen und Ablegen), unterstützt durch die Bildverarbeitung

Die finalen Leistungsparameter von BROMMI:TAK sind:

- Zielgeschwindigkeit: 500mm/s
- Positioniergenauigkeit:  $\pm 15\text{mm}$
- Wiederholgenauigkeit:  $\pm 5\text{mm}$
- Handhabungsgewicht: 1,5kg
- Rüsseleigengewicht (ohne Basis): 12kg
- Leistung: Stand-by 10W, Betrieb 50W + Druckluft
- Materialkosten gesamt: 10 Teuro



Abbildung 11: Tripedale Alternanzkaskade (TAK) in der Anwendung, links als Helfer am Tisch und, rechts in der automatischen Montage, nachgestellt an der TUB (Foto: TU Berlin)

### II.1.2.3 project:syntropy GmbH

Das Bildverarbeitungssystem besteht im Wesentlichen aus zwei Modulen. Eines dieser Module dient zur stetigen Überwachung der Ist-Position und Orientierung des Greifers (TCP-Tool Center Point) im Arbeitsraum. Das zweite Modul dient zur Lokalisierung der zu greifenden Objekte innerhalb des Arbeitsbereiches.

Die Basis des Moduls zur Überwachung der Ist-Position des Greifers bildet ein Kamerasystem, welches aus mehreren Infrarotkameras besteht. Die Anzahl und Anordnung dieser Kameras sind abhängig von der Geometrie des Arbeitsraumes und der sich im Bild befindlichen Störobjekte, zu denen auch der Manipulator selbst gehört. Ein weiterer Aspekt für die Anordnung und die Anzahl der IR-Kameras ist deren Sichtbereich. Die an den Greiferbacken angebrachten Marker müssen zu jedem Zeitpunkt im Sichtbereich von mindestens drei Kameras liegen.

Die Marker werden einmalig nach der Kalibrierung des Kamerasystems zu einem Markerobjekt zusammengeführt, welches für die Positionsberechnung herangezogen wird.

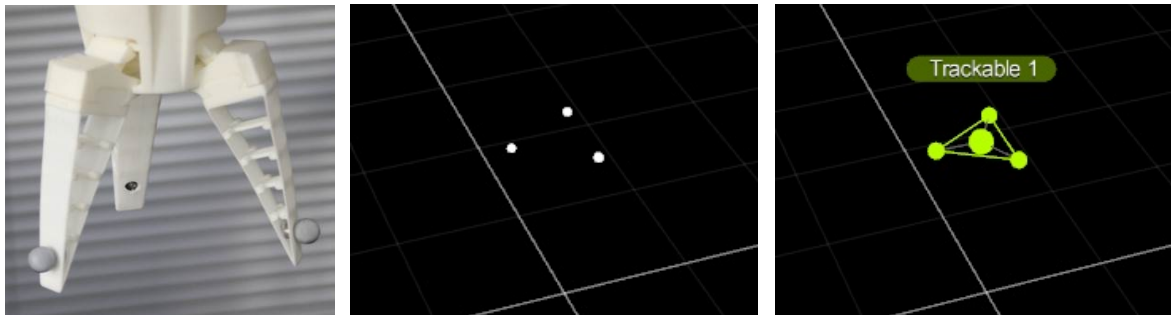


Abbildung 12: von links nach rechts - Greiferbacken mit angebrachten Markern, detektierte Marker und Zusammenschluss zu einem Markerobjekt (Foto: project:syntropy GmbH)

Die Position des Markerobjektes wird in einem kontinuierlichen Datenstrom an die Robotersteuerung übertragen. In durchgeführten Versuchen mit beiden Demonstratoren wurde eine Genauigkeit der Positionsbestimmung von  $\pm 1,0$  mm festgestellt. Die Berechnungsgeschwindigkeit betrug dabei 20 Millisekunden.

Die Positionsbestimmung von Markerobjekten ist Stand der Technik, für die bereits mehrere Lösungen verfügbar sind. Aus diesem Grund wurde eine in der Praxis bewährte Implementierung in die Bildverarbeitungssoftware integriert.

Das zweite Modul der Bildverarbeitungssoftware dient zur Lokalisierung der zu greifenden Objekte. Die Basis hierfür bilden die am System angebrachten Grauwertkameras. Auflösung, Anzahl und Anordnung der Kameras sind dabei wiederum abhängig von der Geometrie des Arbeitsraumes. Je höher die Auflösung und die Anzahl der Kameras sind, desto höher ist die Genauigkeit der errechneten Position des zu greifenden Objektes. Gleichzeitig erhöhen sich jedoch auch der Rechenaufwand und die Berechnungszeit für die Bestimmung der Position.

Die Objekterkennung erfolgt in mehreren Schritten. Den Beginn markiert die Anfrage nach der Position des zu greifenden Objektes durch die Robotersteuerung. Diese Anfrage beinhaltet die für den Lokalisierungsprozess benötigte vordefinierte ID der Objektgruppe.



Informationen zu den erwarteten Objektgruppen sind in einer Datenbank abgelegt. Nach dem Eintreffen eines Lokalisierungsauftrages wird durch jede Kamera ein Bild generiert und an die Bildverarbeitungssoftware transferiert. In diesen Bildern erfolgt eine Segmentierung aller im Bild befindlichen Objekte durch eine Kombination mehrerer Low-Level Bildverarbeitungsoperatoren. Das Ergebnis dieser Operationen sind Bilder, in denen lediglich die sich im Arbeitsraum befindlichen Objekte weiß dargestellt sind.

Der zweite Schritt beinhaltet die Detektion eines Objektes der durch die ID angegebenen Objektgruppe. Zu diesem Zweck wird ein virtuelles Modell des Kamerasystems erstellt. Dabei werden die virtuellen Kameras exakt an die Stelle gesetzt, an denen sich die realen Kameras im Weltkoordinatensystem befinden. An den Weltkoordinatenursprung wird dann das Modell eines Objektes der entsprechenden Objektgruppe projiziert. Die hierzu benötigten Daten entstammen der Objektdatenbank. Dieses Modell wird anschließend verschoben und rotiert, bis das virtuelle Modell mit dem Abbild eines realen Objektes dieser Objektgruppe übereinstimmt. Die dadurch ermittelten Positionsdaten werden im Anschluss an die Robotersteuerung gesendet.

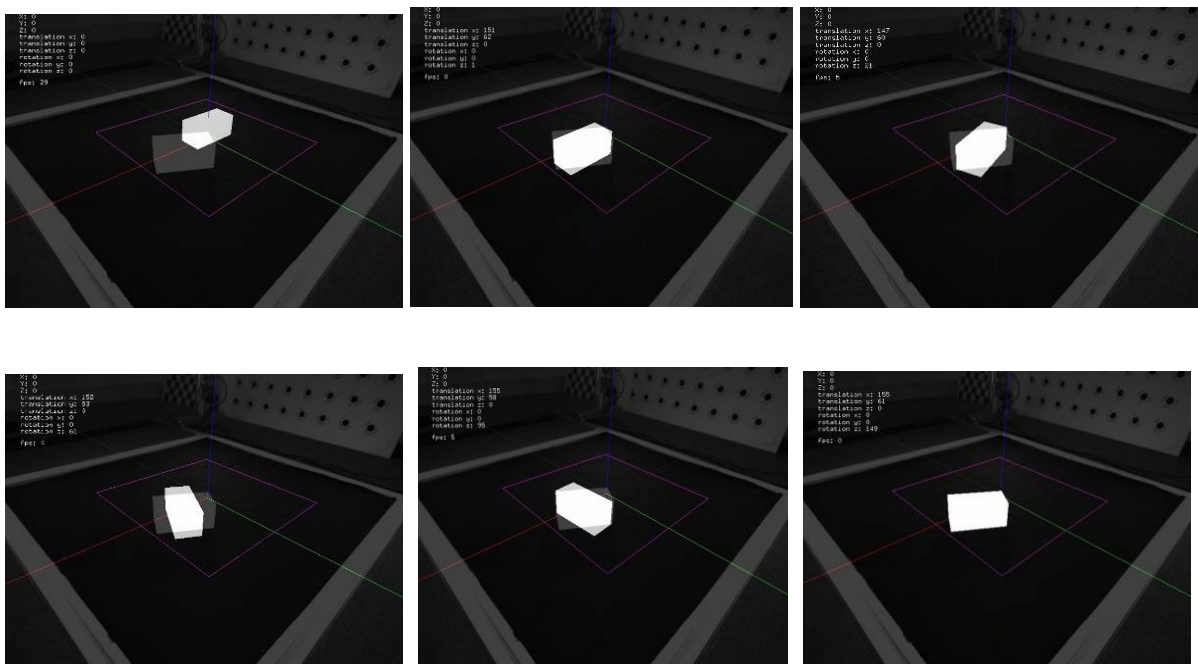


Abbildung 13: Prozess der Objekterkennung (Grafik: project:syntropy)

Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass sich die Objekte auf dem Boden des Arbeitsraumes befinden. Weiterhin müssen die Geometrien der zu detektierenden Objekte bekannt sein und in einem 3D-Modell vorliegen. Im Projekt durchgeführte Versuche ergaben eine Genauigkeit bei der Positionsbestimmung zu greifender Objekte von  $\pm 1,5$  mm.

Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Ist-Position des Greifers (TCP) lag bei ca.  $\pm 1,0$  mm. Die in der Vorhabenbeschreibung geforderte Toleranz von  $\pm 4,0$  mm des 3D-Objekterkennungssystem wurde sicher erreicht.

Das entwickelte Kamerasystem ist skalierbar und kann für den Einsatz in fast allen anderen Arbeitsbereichen adaptiert werden. Es können nahezu alle Objekte detektiert werden, welche dem System durch ein hinterlegtes 3D-Modell bekannt gemacht worden sind.

## II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In der nachfolgenden Tabelle sind die Kosten- und Personalkapazitätsstruktur des Projekts für die einzelnen Partner und die Material- und Reisekosten aufgeführt.

Projektpartner	Fraunhofer IFF	TU-Berlin	[project:syntropy]	BGIA (assoziiert)	FESTO (assoziiert)	Gesamt
Personenmonate	66	65	28			159.170
Personalkosten [€]	738.019	418.911	204.960			1.329.979
Investitionen [€]		15.669				15.000
Materialkosten [€]	15.000	16.871	4.000			52.000
Reisekosten [€]	1.500	8.700	1.000			11.200
sonstige Kosten [€]		2.450	7.500			7.500
Gesamtkosten [€]	754.519	462.601	217.460			1.415.679
Förderquote [%]	100	100	70			
Fördergelder [€]	754.519	462.601	152.222			1.350.441

Tabelle 4: Kosten- und Personalkapazitätsstruktur

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt beinhaltete aufgrund des Neuheitsgrades der Entwicklungen ein sehr hohes wissenschaftlich-technisches Risiko.

Das biologische Vorbild des Elefantenrüssels wurde in zwei Konstruktionen mit intelligenter Sensorik und Steuerung überführt. Erstmals wurde eine biologisch inspirierte technische Umsetzung des Elefantenrüssels auf der Basis von elektrisch angetriebenen Modularkinematiken vorgenommen.

Auf Grund der hohen Komplexität hinsichtlich der Konstruktion, Sensorik sowie der Steuer- und Regelungstechnik war ein hoher Vernetzungsgrad notwendig. Die entwickelten Demonstratoren SMK und TAK bilden eine Basis für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion, ohne das von ihnen selbst bei Fehlfunktionen ein Gefahrenpotential für den Menschen entsteht.

Es waren zahlreiche Iterationen bei der System- und Konzeptentwicklung erforderlich, um eine sichere Basis für die Realisierung der Funktionsmuster zu haben. In welchem Maße der Markt flexible Roboterarme aufnimmt und die Umsetzung der Entwicklung in Form von Produkten wirtschaftlich funktionieren wird, kann zurzeit noch nicht genau abgeschätzt werden.

Zur Minderung der beschriebenen Risiken und einer erfolgsversprechenden Umsetzung war die Ausreichung von Fördermitteln zwingend notwendig. Der im Berichtszeitraum von Festo entwickelte Bionische Handling-Assistent hat die Durchführung und die Zielsetzung des BROMMI-Projektes nicht eingeschränkt. Die beiden BROMMI-Demonstratoren und der Handling-Assistent haben mit dem Elefantenrüssel das gleiche bionische Vorbild. Die Umsetzung erfolgte jedoch bei Festo mit eigens dafür entwickelten pneumatischen Balgelementen. Dagegen wurde im BROMMI-Projekt mit pneumatischen Muskeln (TAK) und mit elektrisch angetriebenen Mechaniken (SMK) das der Natur entlehnte Wirkprinzip nachgebaut.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen (Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans)**

### **II.4.1 Verwertungsplan Fraunhofer IFF**

Die wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse erfolgte durch Veröffentlichungen und Tagungsteilnahmen, die zur Bildung eines fachlichen und strategischen Netzwerkes genutzt worden sind. Außerdem wurde das wissenschaftliche Arbeitsgebiet „sichere Robotersysteme“ und Mensch-Roboter-Interaktion in Deutschland weiter etabliert. Im Jahr 2011 begann am Fraunhofer IFF der Aufbau des Labors „Mensch-Roboter-Interaktion“, in dem der Demonstrator SMK aufgebaut und erprobt wurde. Es ist zu erwarten, dass sich aus dem Projekt neue Anregungen und Anwendungen oder alternative Lösungskonzepte herausbilden, die bereits zur Laufzeit oder im Anschluss den Ursprung zu nachfolgenden oder ergänzenden Projekten bilden. Außerdem wurde mit Veröffentlichungen das Interesse von Industriekunden geweckt, so dass mit Hilfe des Netzwerkes und der Industriepartner neue Projekte initiiert werden können. Als ein Exponat auf der Internationalen Fachmesse für Robotik und Mechatronik – AUTOMATICA 2012 – in München fand die serielle Modularkinematik SMK große Beachtung. Potentielle Kunden aus der Industrie haben BROMMI als neuartiges Robotersystem sehr positiv zur Kenntnis genommen und dessen Vorteile gegenüber herkömmlichen Robotersystemen erkannt.



Abbildung 14: Demonstrator SMK auf dem Stand des Fraunhofer IFF bei der AUTOMATICA 2012 in München (Foto: IFF)

Die technologische Verwertung lag einerseits in der experimentellen Evaluierung eines neuen Systemkonzepts und den daraus resultierenden Schlussfolgerungen für strategische, technologische Entwicklungen im Bereich der sicheren Robotersysteme für den Einsatz im gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Roboter. Andererseits stellen auch die Teilkomponenten attraktive technologische Resultate zur gerätetechnischen Anwendung dar. Die wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse hat nach Projektabschluss mit der Bereitstellung des Prototyps begonnen. Auf Grundlage der Projektergebnisse sollen auch weiterhin neue Anwendungen und Industriepartner für neue Projekte und Produktentwicklungen gewonnen werden.

Der Nachweis der Machbarkeit und des Nutzens sicherer Robotersysteme führte zu einer wesentlich flexibleren Kooperation und Verbreitung solcher Systeme nicht nur in der Automatisierung, sondern auch im öffentlichen Raum. Die Ergebnisse des Projektes wurden herangezogen, um eine Entscheidung über die Notwendigkeit gesetzlicher oder normativer Regelungen über solche Systeme zu treffen. Konkret spiegelt sich dies in Kollisionsuntersuchungen wider, mit denen das Fraunhofer IFF durch das Institut für Arbeitsschutz (IFA) beauftragt worden ist. Die dabei generierten Ergebnisse fließen als Basisdaten in eine neue Norm für die Mensch-Roboter-Interaktion ein.

#### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden weiterhin sehr positiv eingeschätzt. Im Rahmen der Fachtagung „Sichere Mensch-Roboter-Interaktion“ anlässlich der 14. IFF-

Wissenschaftstage im Juni 2011 wurde das Projekt BROMMI und die SMK einem Fachpublikum vorgestellt. Seitens des Auditoriums wurden großes Interesse geäußert und verschiedenste Applikationen im Produktionsbereich thematisiert.

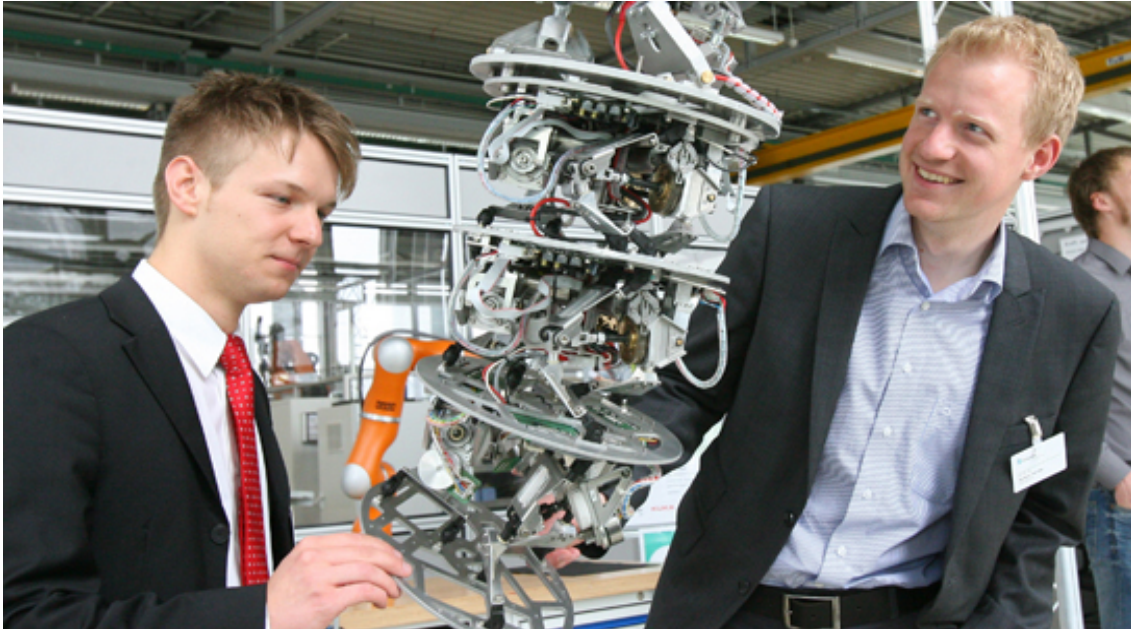


Abbildung 15: Präsentation der SMK auf den 14. IFF-Wissenschaftstagen (Foto: IFF)

#### Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Eine hyperredundante Kinematik wie die SMK ist im wissenschaftlichen Bereich von hohem Neuheitsgrad. Die Modellierung und Steuerung einer solchen Kinematik stellt eine hohe wissenschaftliche Herausforderung dar, die im Wissenschaftsbereich auf hohes Interesse stößt (wie die die Annahme des wissenschaftlichen Artikels auf der ICRA 2011 zeigte). Die Ergebnisse aus der Konstruktion der SMK und ihrer vollständigen Modellierung sind als erfolgreiche wissenschaftliche Ergebnisse zu nennen, die durch Veröffentlichungen und auf internationalen Kongressen einem interessierten Fachpublikum weiterhin vorgestellt werden, um die Entstehung projektübergreifender Synergien und Netzwerke zu fördern.

#### Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Möglichkeiten der hyperredundanten Kinematik SMK bieten vielseitige Potentiale für Anschlussprojekte. Diese umfassen die folgenden thematischen Schwerpunkte:

- Leichtbau: Optimierung der gegenwärtigen Konstruktion und verstärkter Einsatz von Leichtbaumaterialien und Kunststoffen
- Erweiterte Steuerung: energie-, zeit- und polyoptimale Steuerung der Kinematik
- Skalierung: Anpassung der SMK für Anwendungen mit unterschiedlichen Belastungsvorgaben und für mobile Anwendungen
- Trajektoriengenerierung: eine hyper-redundante Kinematik wie die SMK bietet viele Möglichkeiten der optimierten Bahnberechnung unter verschiedenen Schwerpunkten
- Optimierung der Positioniergenauigkeit für unterschiedliche Industrieapplikationen sowie Anwendungen im Labor und AAL-Bereich

## **II.4.2 Verwertungsplan TU Berlin**

Unabhängig der nachfolgend ausgeführten Verwertungsarten kann ein erfolgreiches Sensor-Aktor Konzept inklusive einer biologisch motivierten Regelung zu neuen Fragestellungen und Forschungsprojekten führen, die wiederum als technologie- und wirtschaftstreibend angesehen werden können.

### **II.4.2.1 Wissenschaftliche Verwertung**

Die wissenschaftliche Verwertung liegt in der Erstellung von Publikationen (Bachelor/Masterarbeiten, wissenschaftliche Veröffentlichungen), in der aktiven Teilnahme an Kongressen und Netzwerken u.a. in Form von Vorträgen und in der Durchführung weiterführender Verbundvorhaben. Dabei steht die Stärkung des Wissenschaftsstandortes Deutschland in den Bereichen nachgiebige Regelung, pneumatische Systeme und Bionik im Vordergrund.

Das Wissenschaftsgebiet der nachgiebigen Regelung von Muskelsystemen ist relativ jung. Es gibt weltweit nur wenige Wissenschaftler, die sich damit beschäftigen und das enorme Potential derartiger elastischer Systeme erkannt haben. Ganzheitlich funktionierende Demonstratoren dieser Gruppe sind selten, so dass Deutschland hier mit BROMMI:TAK die Führerschaft weiter ausgebaut hat. Parallel ist eine Community entstanden, die diesen Teilbereich der Regelungstechnik und Robotik im europäischen Kontext vorantreibt. Im Rahmen der VDI-Richtlinie Bionik (VDI 6220) entstand während der Projektlaufzeit die VDI-Richtlinie Bionische Robotik (VDI 6222) deren Vorsitz die TU Berlin hatte und an der 3 der Projektpartner beteiligt waren. Diese beschäftigt sich u.a. mit der Verbindung von Bionik, Nachgiebigkeit und Sicherheit. Die VDI-Richtlinie dient derzeit als Grundlage für eine Richtlinie des DIN.

Während der Projektlaufzeit entstanden an der TU Berlin die folgenden 6 wissenschaftlichen Arbeiten:

1. Ganzheitlich funktionierende Demonstratoren vereinen über technische Fachgebiete hinaus auch Gewerke, die sich mit dem Interaktionsdesign und der Gestaltung technischer Systeme befassen. Das Design der Interaktion und der Gestaltung von BROMMI:TAK wurde in Zusammenarbeit mit der Kunsthochschule Berlin Weißensee in Form einer Semesterarbeit des Studenten Björn Bertrand entwickelt und umgesetzt.
2. Die ukrainische Arbeit von Herrn Ivan Perfilov (TU Berlin) basiert auf der Konstruktion eines Segmentes und der Ineinanderkaskadierung mehrere Segmente zu einem hyperredundanten Rüssel. Hinzu kommen Ergebnisse der Anordnung der Muskeln zur Bauraumreduzierung, die Trennung von Kraftarm und sensorisch erfasstem Basisskelett sowie die mobile Basis, welche den zuverlässigen und praktikablen Einsatz im Ambient Assisted Living (AAL) möglich machen. Der Sicherheitsaspekt wird durch die nachweislich passive Nachgiebigkeit der Muskeln, als auch der Gesamtkinematik gewährleistet, so dass eine „Einhausung“ oder Abgrenzung mit Schutzgitter nur noch an sehr wenigen Stellen nötig ist.
3. In Zusammenarbeit mit der Festo AG konnte ein Aufbau zur Ansteuerung von pneumatischen Muskeln mit Piezoventilen getestet werden. Diese Ventile sind im Bereich mobile pneumatische Robotik zukunftsweisend. Ihr geringes Gewicht ist

genauso vorteilhaft für eine Mensch-Maschine Interaktionen, wie das praktische Fehlen von Verschleiß. Gerade letzteres ist im Bereich Sicherheit und Verlässlichkeit nicht zu unterschätzen und ein deutlicher Entwicklungssprung weg von den EMV-lastigen Magnetventilen. Leider konnte zum jetzigen Zeitpunkt noch keines dieser neuen Piezo-Ventile eingesetzt werden, da ihre Verfügbarkeit aktuell noch zu gering war. Untersuchungen und Entwicklungen dazu wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit von Herrn Bernhard Föllmer (TU Berlin) mit dem Titel „Entwicklung, Aufbau und Test einer Schaltung zur Spannungsgenerierung und Steuerung von Piezoelementen“ 2011 durchgeführt. Die in der Arbeit entwickelte Ansteuerung bildet die Grundlage für Weiterentwicklungen am Fachgebiet Regelungssysteme der TU Berlin auf diesem Gebiet. Die Konstruktion, Elektronik und Ansteuerungssoftware der TAK ist für den Einsatz dieser Art von Piezo-Ventilen vorbereitet. Darüber hinaus konnte in der Robotik-Community ein Bewusstsein geschaffen werden, dass mit diesen Bauteilen pneumatische Systeme auch für andere Bereiche interessant sind.

4. Untersuchungen im Bereich Mikrosensorik von pneumatischen Systemen sind in der Diplomarbeit von Herrn Bilal Khaled mit dem Titel „Auswahl, Messaufbau und Test von Sensoren für einen Roboterarm mit Hilfe eines Mikrocontrollers“ 2011 veröffentlicht worden. Die Arbeit fokussiert verlässliche Druck- und Winkelsensoren zur Datenerhebung im Bereich von 100 Hz bis 100 kHz zur verlässlichen Bestimmung des Ist-Zustandes. Ein Punkt der für eine sichere Regelung unerlässlich ist. Im wissenschaftlichen Umfeld liegt das Interesse auf der Druckmessung abhängig von Typ und Position der Sensoren, welches in einer weiteren wissenschaftlichen Veröffentlichung bearbeitet werden wird.
5. Die Hyperredundanz der vorliegenden Kinematik ist im Rahmen einer Diplomarbeit von Herrn Michal Drozd mit dem Titel „Entwicklung und Verifikation eines allgemeinen kinematischen Modells für kontinuierliche Roboterarme in Matlab/C++“ analytisch beschrieben worden. Auf dieser Beschreibung basiert die Bahnplanung der zentralen Steuereinheit. Die Reduzierung der überzähligen Parameter erfolgt dynamisch nach ausgewählter Planungsstrategie. Durch die begrenzte Projektlaufzeit ist derzeit nur eine arbeitsraumoptimale Vorparametrisierung auswählbar. In zukünftigen Arbeiten kann darauf aufgebaut werden, um Vorgaben wie z.B. eine mechanische Hinderniserkennung sowie belastungs- und gefärdungsminimale Bewegungen zu realisieren.
6. Die Regelstrategie einer flachheitsbasierten Vorsteuerung und Regelung wurde im Rahmen einer Masterarbeit von Herrn Ningxuan Li mit dem Titel „Theoretische Untersuchungen von verschiedenen Regelungskonzepten an einem pneumatischen betriebenen Tripod“ 2011 untersucht. Der flachheitsbasierte Ansatz basiert auf der Invertierung des physikalischen Systems eines Segmentes, um Nichtlinearitäten kompensieren zu können. Der Vorteil dabei ist, das die komplette Trajektorie (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Rück) des Ausgangs am Eingang vorgegeben werden kann. Die Modellinverse liefert dazu dann die entsprechende Stellgröße für die physikalische Strecke. Einfache lineare Regler können dann Zustandsfehler auf die Stellgröße rückkoppeln.

#### **II.4.2.2 Die technologische Verwertung**

Der Einsatz und die Kombination von neuartigen, additiven Werkstoffen ermöglicht die Entwicklung von Kinematiken im Rapid-Prototyping Verfahren, die dann nicht nur ressourceneffizient in der Herstellung sondern auch energieeffizient im Betrieb sind. Die Technologie der Kombination von Bauteilen bzw. Komponenten mit spezifischer Funktion und reinen Volumenbauteilen wird weiter vorangetrieben. Ziel ist, das für die jeweilige Aufgabe beste Material als Funktionsbauteile über einen additiv hergestellten Volumenkörper auf Position zu halten.

Weiterhin soll das dezentrale Steuerungskonzept nach biologischem Vorbild weiter gefestigt und vorangetrieben werden. Dazu gehören einerseits die Verschaltung und Kommunikation der dezentralen Einheiten untereinander als auch die Konfiguration einer logischen Einheit aus muskelspezifischer Sensorik und Sensorverarbeitung, Festwert- und ggf. Reflex-Regelung und Ventilansteuerung des Muskelaktuators. Die alternativen Sensorkonzepte haben sich über die Praxis bewährt und sollen als Standard für dieses Antriebskonzept etabliert werden.

#### **II.4.2.3 Die wirtschaftliche Verwertung**

Der entstandene Prototyp BROMMI:TAK ist Grundlage eines Nachfolgeprojektes mit Partnern in der Automobilindustrie und eines weiteren beantragten Verbundvorhabens.

BROMMI:TAK ist Teil der VDI-Richtlinie Bionische Roboter (VDI-6222) welche vom VDI weltweit vertrieben wird.

Ergebnisse die bei der Verwendung von Festo-Komponenten und bei der Weiterentwicklung von Ansteuerungskomponenten und Systemen entstanden sind, stehen auch dem Verbundpartner Festo zur Verfügung und können in dessen Produktpalette einfließen.

#### **II.4.2.4 Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten**

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind sehr gut einzuschätzen.

In einem Anschlussprojekt werden Segmente für einen sicheren Manipulator in der automatisierten Montage im Automobilbau verwendet. Dazu hat sich ein großer deutscher Automobilhersteller committed.

Des Weiteren besteht Interesse, das vorliegende Segment aus 2 Freiheitsgraden, um ein pneumatisches Schubgelenk zu erweitern. Hierzu wird derzeit eine Projektskizze mit KMU-Beteiligung erstellt.

#### **II.4.2.5 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten**

Die Kombination aus Kunststoff mit Armierungen als Trägermaterial (Volumenkörper) und Zugbändern (Funktionsseparation) führt zu einer neuen Art von Konstruktion, deren material-technische Analyse derzeit noch am Anfang steht. Derartige Leichtbaukonstruktionen eignen sich besonders für die Bereiche Ambient Assisted Living (AAL) und Servicerobotik und dort besonders für mobile und nachgiebige Kinematiken in der Mensch-Roboter-Interaktion.

Technisch umgesetzte biologische Regelungskonzepte natürlicher Muskeln in Verbindung mit besonders für diese Anwendung geeigneten, herkömmlichen Regelungskonzepten führen zu einer neuen Qualität von Regelungen für Roboter mit fluidischen Muskeln.



Die Analyse und Optimierung von Stellungen und Bahnen im Raum von (hyper-)redundanten Kinematiken mit nicht festgesetzten Freiheitsgraden ermöglicht die Einbeziehung von übergeordneten Steuerungszielen wie energie-optimale Stellung, kürzeste oder energie-optimale Bahn. Problem hierbei ist die kinematische Rückwärtsrechnung, da die überzähligen Freiheitsgrade zu einem unterbestimmten Gleichungssystem führt, welches unendlich viele Lösungen hat. Dieser Herausforderung steht aber ein großer Nutzen entgegen, da hyper-redundante Kinematiken Vorteile z.B. beim Erreichen und Umfahren von Objekten haben.

#### **II.4.2.6 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit**

Deutschland ist führend in der Entwicklung von Robotern für die Montage. Sichere und nachgiebige Robotersysteme können diese Position weiter festigen und ausbauen. Die Kombination aus additiver (leichter, kostengünstiger, schneller) Herstellung, neuartigen Aktoren (neue positive Eigenschaften) und deren Kontrolle (dezentrale Steuerung) führt zu neuen Anwendungsfeldern in der Mensch-Technik-Interaktion in der sich demographisch wandelnden Gesellschaft. Alle drei Kernthemen werden im internationalen Kontext bearbeitet und werden zu weitreichenden wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht nur in der Robotik und der Mensch-Technik-Interaktion führen.

Die Idee und Umsetzung von muskelbetriebenen ineinander kaskadierten Segmenten wird in einem Anschlussprojekt zu einem industriell eingesetzten Prototyp wissenschaftlich wie technologisch weiterentwickelt. Dieser soll dann in der automatisierten Montage bei einem großen deutschen Automobilhersteller prototypisch eingesetzt werden, um Werker bei ihrer teilweise noch schweren Arbeit zu unterstützen.

Hyperredundante rüsselartige Manipulatoren ergänzen und erweitern das Portfolio herkömmlicher Manipulatoren um die Möglichkeit, die überzähligen Freiheitsgrade zur erweiterten Positionierung (Kollisionsvermeidung) und für übergeordnete Ziele der Bahnplanung (energieoptimale Position) zu verwenden.

#### **II.4.3 Verwertungsplan [project:syntropy] GmbH**

Die project:syntropy GmbH strebt zusammen mit den Projektpartnern die Fertigung eines vorführbereiten Prototyps des Rüsselroboters an. Neben der Bewältigung der technischen und sicherheitstechnischen Risiken wird vor allem der Herstellungspreis eine wesentliche Rolle für die erfolgreiche Vermarktung des Rüsselarmes in den Märkten einnehmen. Die Optimierung der Fertigungskosten durch die Verwendung handelsüblicher und kostengünstiger Komponenten stellt damit einen wesentlichen Schritt bei der Weiterentwicklung der Kinematiken dar.

Nach Auswertung der anschließenden Erprobungsphase soll der Rüsselarm vollständig in ein erstes marktreifes Stadium überführt werden. Der Rüsselarm soll fester Bestandteil des Portfolios der project:syntropy GmbH für den neuen Geschäftsbereich innerhalb der Industrie- und Servicerobotik werden.

Die Bildverarbeitungssoftware zur Berechnung der Ist-Position einer Kinematik und zur Detektion von Objekten stellt hierbei eine Basis für zukünftige Entwicklungen im Bereich neuartiger Industrie- und Servicerobotik dar.

Anwendungsbereiche:

Für die bionische Rüsselkinematik erschließen sich verschiedenen Anwendungsbereiche. Zum einen im Bereich der Industrierobotik als sicherer Manipulator in direkter Umgebung eines Werkers. Vorstellbar sind hier Szenarien in denen der Werker „Hand in Hand“ mit dem Manipulator arbeitet oder diesen als dritte Hand nutzt. Im Bereich der Servicerobotik dient die Rüsselkinematik zur interaktiven Unterstützung des Menschen z.B. bei handwerklichen Tätigkeiten.

Ein weiterer neuer Bereich könnte die humanitäre Pflege (auch im häuslichen Bereich) mittels Serviceroboter oder für Rehabilitationsaufgaben werden. In diesem Zusammenhang soll die Erfüllung der notwendigen rechtlichen Normen weiter vorangetrieben werden, so dass die Realisierung erster Anwendungen prototypisch erfolgen kann.

## **II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Der assoziierte Projektpartner Festo entwickelte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPA den Bionischen Handling-Assistenten, der erstmalig auf der Hannover Messe 2010 präsentiert worden ist. Der Bionische Handling-Assistent wurde in Anlehnung an den Rüssel eines Elefanten konstruiert und besteht aus einem künstlichen Arm, einem Handgelenk und einem 3-Finger-Greifer.

Die Bewegung des Greifarms wird durch die Beaufschlagung der aneinandergereihten Balgstrukturen aus Kunststoff mit Druckluft realisiert, die an den Schnittstellen der Grundelemente über eine spezielle Ventiltechnik zugeführt wird. Die Rückstellung erfolgt durch die schlaufenartige Konstruktion der Aktoren, die nach Ablassen der Druckluft wie eine Zugfeder wirkt.

Der hochflexible Greifarm ist 110 cm lang und kann bei einem Eigengewicht von 1,8 Kilogramm Gegenstände mit einer Masse bis zu 500 Gramm greifen und bewegen.

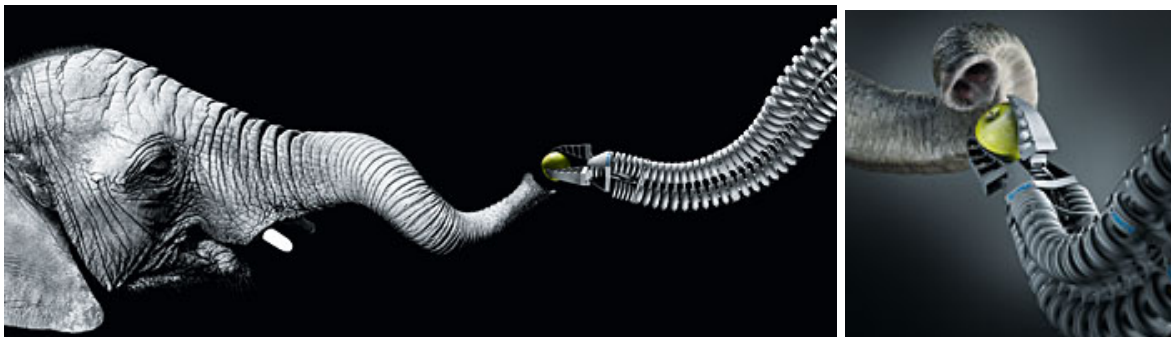


Abbildung 16: Bionischer Handling-Assistent (Fotos: Festo AG)

## II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

### II.6.1 Veröffentlichungen Fraunhofer IFF

N. Elkmann, "Neue Technologien für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion", 2011 VDI/VDE-Sitzung des Fachausschusses „Steuerung und Regelung von Robotern“, Augsburg

R. Behrens, C. Kuechler, T. Foerster, and N. Elkmann, "Kinematics Analysis of a 3-DOF Joint for a Novel Hyper-Redundant Robot Arm", 2011 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China

C. Walter, R. Behrens, M. Fritzsche, C. Vogel, und N. Elkmann, „Neue Technologien für Sichere Mensch-Roboter-Interaktion“, 2011 14. IFF-Wissenschaftstage, Fachtagung Mensch-Roboter-Interaktion, Magdeburg

M. Fritzsche, C. Vogel, C. Walter, R. Behrens, und N. Elkmann, "Neue Technologien für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion in der Produktion und Medizintechnik", 2011 Magdeburger Maschinenbau Tage, Magdeburg

N. Elkmann, Neue Technologien für sichere Mensch-Roboter-Interaktion, 2012 Fachworkshop „Produktion 2020: Sichere Mensch-Maschine- und Mensch-Roboter-Kooperation, Nördlingen

R. Behrens, M. Poggendorf, E. Schulenburg, and N. Elkmann, "An Elephant's Trunk-Inspired Robotic Arm – Trajectory Determination and Control", 2012 VDE 7th German Conference on Robotics, Germany, Munich

N. Elkmann, "Sicherheit und Mensch-Roboter-Kooperation: Grundlagen, Lösungsansätze, neue Entwicklungen“, 2012 Hannover Messe, Hannover

N. Elkmann, M. Fritzsche, R. Behrens, C. Vogel, C. Walter, „Neue Sensorsysteme sorgen für sichere Mensch-Roboter-Interaktion“ MM Maschinenmarkt 006-2013

### II.6.2 Veröffentlichungen TU Berlin

#### II.6.2.1 Paper

Boblan I., Schulz A., Perfilov I., Bertrand B., "A Compliant Lightweight Universal Joint Cascadable to a Multi-joint Kinematics", 6<sup>th</sup> Int. Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, AMAM, 2013, Darmstadt, Germany

Boblan I., Schulz A., Perfilov I., Huynh Q-U., „- METAL-PLASTIC - A Combination of a Polyamide Solid and Rigid Force Transmitting Materials for Lightweight Constructions“, J. of Applied Mechanics, ASME, 2012, p. 10 (in peer review)

Boblan I., Perfilov I., Schulz A., Bertrand B., „Tripedal Alternation Cascade – A Lightweight Spherical Joint for Multi-joint Kinematics“, J. of Mechanisms and Robotics, ASME, 2012, p. 8 (in preparation)

Boblan I., Perfilov I., „A Simplified Closed Inverse Kinematics of a Hyper-redundant Multi-joint Kinematics after the role model of an Elephant's trunk“, J. of Mechanisms and Robotics, ASME, 2012, p.7 (in preparation)

Weitere Veröffentlichungen sind in Planung.

### II.6.2.2 Eingeladene Vorträge

Boblan I., "Bionik und Robotik - Wie geht das zusammen?", Hannover Messe Industrie 2010, Tech-Transfer Forum, Hannover, 2010

Boblan I., "Control of inherently compliant actuators for sensitive robots of the future", Int. Industrial Convention on Biomimetics 2011, Maritim Hotel Berlin, Berlin, 2011

Boblan I., "The biomimetic approach for development of bio-inspired robots ZAR5 and TAK3", 2<sup>nd</sup> Korean-German Joint Workshop on Biomimetics, Estrel Convention Center, Berlin 2012

Boblan I., "Biomimetic trunk kinematic for supporting assembly and interaction tasks in the service area", 6. Bremer Bionik-Kongress "Patente aus der Natur", Hochschule Bremen, Bremen, 2012

Boblan I., "Green Robotics? Nachhaltigkeit von Robotersystemen an den Beispielen BROMMI:TAK und ELAN: BioFlex", Symposium Prototype Nature - Die Rolle der Bionik für eine nachhaltigere Zukunft – und Abschlussveranstaltung der Fördermaßnahme BIONA des BMBF, Folkwang Universität der Künste, Sanaa-Gebäude, Essen, 2012

### II.6.3 Veröffentlichungen [project:syntropy] GmbH

Die [project:syntropy] GmbH plant, ihre im BROMMI-Projekt erzielten Forschungsergebnisse auf ihrer Homepage zu veröffentlichen. Dadurch soll auch direkt auf das erweiterte Portfolio, den Vertrieb von flexiblen Roboterarmen einschließlich der erforderlichen 3D-Objekterkennung, aufmerksam gemacht werden. Details der im Rahmen des BROMMI-Projektes entstandenen Technologien zur 3D-Objekterkennung werden aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht.

Magdeburg/Berlin, den 22.02.13



Dr. techn. Norbert Elkmann  
Fraunhofer IFF

Dr.-Ing. Ivo Boblan  
TU Berlin



Dipl.-Ing. Christoph Bode  
[project:syntropy] GmbH