Abschlussbericht

Vorhaben:	Verbundvorhaben: Mitwirkung am Bionik – Kompetenz - Netzwerk BIOKON Phase II, Mikrosystemtechnik, Bionik in der Medizintechnik ; Teilvorhaben 14
Förderkennzeichen:	01RS0414
Ausführende Stelle:	Technische Universität Ilmenau Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Biomechatronik Postfach 10 05 65, 98684 Ilmenau
Projektleiter:	Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte
Laufzeit:	01.06.2004 – 31.05.2007 (Ende nach ausgabenneutraler Verlängerung 30.06.2007)

Inhaltsverzeichnis
(Nummerung I. und II. analog zu 3.2 BNBest-BMBF 98, Anlage 2, I. und II.)

I. Kurze Darstellung ***3***

I.1 Aufgabenstellung **3**

I.2 Voraussetzungen **3**

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens **6**

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand **6**

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen **8**
I.5.1 Regionale, nationale und internationale Zusammenarbeit 8
I.5.2 Zusammenarbeit innerhalb des BIOKON 9

II. Eingehende Darstellung ***11***

II.1. Erzielte Ergebnisse **11**
II.1.1 Recherchetätigkeit 11
II.1.2 Bearbeitung von Anfragen und Kontaktvermittlung zum Thema Bionik 15
II.1.3 Ergebnisse der grundlegenden Netzwerkarbeit 17
II.1.3.1 Medien, Internet, Datenbanken, Öffentlichkeitsarbeit, Presse (A1) 17
II.1.3.2 Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik (A2) 18
II.1.3.3 Ausstellungen, Messen, Kongresse, Workshops, Tutorials (A3) 22
II.1.3.4 Industrielle Umsetzung (A4) 33
II.1.4 Ergebnisse der thematischen Facharbeit 36
II.1.4.1 Biomechatronik, Biomedizintechnik, Mikrosystemtechnik, Aktuatorik, Robotik (B5) 36
II.1.4.2 Sensorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation (B6) 42
II.1.5 Einwerben weiterer Gelder für Bionik-Projekte 46
II.1.5.1 Projekt „InspiRat“ 46
II.1.5.2 Projekt „EasycaTEX“ 48

II.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises **48**

II.3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit **48**

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse **49**
II.4.1 Aufbereitung der Rechercheergebnisse 49
II.4.2 Bionik und Biomechatronik als integrative Lehrfächer 49
II.4.3 Erstellung und Bereitstellung des Analogiesuchers 52

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen **53**

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses **53**

A1 Referenzliste ***54***

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Der Standort Ilmenau übernimmt Scoutfunktionen (Informationen lokalisieren, sichten, aufbereiten, zur Präsentation vorbereiten) für die drei Kompetenzbereiche:

1. Bionik für die Mikrosystemtechnik
2. Bionik für das Biomedical Engineering
3. Bionisch inspirierte Robotik

Dazu zählen insbesondere die Teilnahme am Ausbau der BIOKON - Gemeinschaftsprojekte „Internetpräsenz“, „Lösungsfinder“, Erweiterung der Industrieberatung, Intensivierung des Industriedialogs und die Vorbereitung einer bionischen Konstruktionssystematik.

Basis für die themengebundene Netzwerkarbeit bilden die bei eigenen F&E-Arbeiten etablierten internationalen Kontakte. Während der Projektlaufzeit werden kontinuierlich alle formellen und informellen Informationsquellen gepflegt und gesichert. Die aufbereiteten Informationen werden den Zielgruppen durch Internetauftritt, Publikationen und Vorträge nahegebracht.

I.2 Voraussetzungen

Ein Spezifikum des Standortes Ilmenau war, dass die Neugründung des Fachgebiets Biomechatronik in die Phase des 2. Förderzeitraums von BIOKON fiel. Das hatte den Vorzug, dass dessen dynamische Struktur in eine wiederum sehr dynamische Umgebung integriert werden konnte, d.h. bei der forschungsseitigen Ausrichtung des Fachgebiets Biomechatronik konnten nach der Inauguration von Prof. Witte die Ziele des Projekts in besonderem Maße berücksichtigt werden.

Der international eingeführte Begriff "Biomechatronik" steht heute für ein Fachgebiet, das aus der konvergenten Entwicklung der Bionik und der Mechatronik hervorgegangen ist. Biomechatronik beschäftigt sich der internationalen Begriffsbelegung folgend, nur mit der Entwicklung von intelligenten elektromechanischen Systemen zur Unterstützung und Wiederherstellung defekter Funktionen des menschlichen Körpers. Sie ist somit ein interdisziplinäres Gebiet, das Robotik, Steuerungstechnik, Biomedizintechnik und Biomechanik, Mensch-Maschine-Interaktion und Rehabilitation einschließt. Gegenstand der Wissenschaftsdisziplin sind u. a. intelligente Prothetik-Systeme, roboterbasierte Bewegungssysteme für Behinderte, mikrotechnische Tools für die minimal-invasive Chirurgie.

Basierend auf der mehrjährigen erfolgreichen Zusammenarbeit von Ingenieuren der TU Ilmenau und Vertretern der "life sciences", beginnend mit dem erfolgreich abgeschlossenen Innovationskolleg „Bewegungssysteme", in besonderem Maße aber auch durch die Intentionen des Bionik-Kompotenz-Netzes konnte das Themenprofil wie auch der Inhalt der Biomechatronik-Ausbildung im Studiengang Mechatronik dahingehend erweitert werden, dass nun nicht nur die Anwendung mechatronischer Systeme **am** menschlichen Organismus, sondern auch ihre Applikation in anderen lebenden Systemen (Organismen, Biotechnik-Anlagen, Umwelt) und insbesondere die Ableitung von Entwurfsideen für technische Systeme **aus** biologischen Vorbildern im Sinne der Bionik einbezogen werden.

Die Fachdisziplin „Biomechatronik“ ist daher in Ilmenau über die Entwicklung und Verbesserung mechatronischer Produkte und Verfahren unter Nutzung biologischen und medizinischen Wissens definiert. Das Fach gründet sich folglich auf den beiden Hauptsäulen Bionik und Biomedical Engineering. Es schließt insbesondere Aspekte der Biomechanik, Biokybernetik, Robotik, Mensch-Maschine-Interaktionen und Präventions- wie Rehabilationsmaßnahmen als Forschungs- wie Lehrgegenstände mit ein.

Des weiteren war eine, wenn auch noch nicht institutionalisierte Basis durch die MitarbeiterInnen des BIOKON I (Dr.-Ing. Lena Zentner und Dipl.-BW W. Kempf) im Vorlauf geschaffen, die im Wesentlichen Erfahrungen bei der Kooperation mit den Initiatoren

und Gründungspartnern des Projekts, bei den Formen der Öffentlichkeitswirksamkeit (Internet-Präsenz, Publikationen, Messeaktivitäten etc.) und den Industriekontakten einbrachten.
Durch die Förderung in der Phase II wurde es neben der Einstellung neuer MitarbeiterInnen, die das Spektrum an Vorkompetenzen erweiterten (Medientechnik, Tierphysiologie, Mechatronik, Biomedizintechnik) möglich, eigene Arbeitsräume aufgabengerecht einzurichten und eine leistungsfähige Infrastruktur zu schaffen.

Die Biomechatronik, die unter der bisher einzigen Professur in der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau beheimatet ist, hat in der Forschung drei Schwerpunkte: Bionik, Mechatronik im Biomedical Engineering und Bionisch inspirierte Robotik. Durch die Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien an der TU Ilmenau besteht eine ausweisbare Sonderexpertise in der Bionik der Mikrosysteme.

Das Fachgebiet Biomechatronik hat zusammen mit Partnern in den ersten 5 Jahren seines Bestehens Drittmittelprojekte im Umfang von mehr als 5 M€ etabliert; für die drei Felder der Kernkompetenz sind bei Bundeseinrichtungen und beim Land Thüringen universitätsübergreifende Projektanträge im Umfang von ca. 4 M€ anhängig realisiert worden (ohne BIOKON-Anträge). Zum Thema „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ existieren Kooperationen mit zwei großen deutschen Automobilherstellern und der Robert Bosch AG sowie mit diversen KMUs. Die „Assistenzsysteme“ ist eine der Hauptforschungslinien der TU Ilmenau. Für die BMBF -Förderung der BIOKON-Scout-Aktivitäten in Ilmenau war folglich ein hohes Return-on-investment zu erwarten.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Kontinuierliche Aufgaben während der gesamten Projektlaufzeit:

1. Allgemeine Netzwerkaufgaben
    - Mitarbeit am gemeinsamen Internetportal (gestalterisch mit dem Schwerpunkt didaktischer Optimierung und Zuarbeit von aktuellen Inhalten aus der Scouttätigkeit)
    - Mitarbeit on den BIOKON - Fachgruppen
    - Beteiligung an Ausstellungen, Messen und Kongressen
    - Öffentlichkeitsorientierte Arbeit
    - Informationstransfer (Industrie, Politik, Bildung, Gesellschaft)
    - Organisation bzw. fachkompetente Unterstützung industrieorientierter Workshops

2. Standortspezifische Aufgaben
    - Scoutfunktion „Mikrobionik“ mit Informationsgewinnung, -aufbereitung und -präsentation
    - Scoutfunktion „Bionik für das Biomedical Engineering“ mit Informationsgewinnung, -aufbereitung und -präsentation
    - Scoutfunktion „Bionisch inspirierte Robotik“ mit Informationsgewinnung, -aufbereitung und -präsentation
    - Zuarbeit für die „L3“ –Aktivitäten der übrigen BIOKON –Partner, Implementierung der gemeinsamen aufzubauenden Strukturen in Ilmenau
    - Zuarbeit für die Entwicklung einer Konstruktionssystematik der Bionik (Federführung durch Prof. Hill, Münster)

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Schon in der ersten Projektlaufzeit (BIOKON, Phase I) war die Mikrosystem-Bionik ein Schwerpunkt. Gerade hier sollten die Entwicklungen weiter verfolgt werden, die in der Phase I schon einen rasanten Fortschritt in Richtung Nanotechnologie und biomedizini-

scher Anwendungen nahm und hinsichtlich ihres bionischen Potenzials keineswegs erschöpfend dargestellt werden konnte. Die Ergebnisse der Analyse wurden von Dr. Schilling in einem zur Vorlage auf Ministerialebene zusammengestellten Buch zusammengefasst (Botthof, A. ; Pelka, J. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik – Zukunftsszenarien., J. Springer-Verlag, 2003).

Ein weiterführender Vernetzungsbedarf mit Kompetenzträgern aus Biologie und Technik ergab sich danach insbesondere mit Zellphysikern, Molekularbiologen und Nanotechnologen, zu denen schon weitreichende informelle Kontakte mit dem Off-spin eines ersten, schon bewilligten Verbundprojektes aufgebaut wurde (BMBF: „Kristalines P-Protein, der neu entdeckte molekulare Absperrhahn in pflanzlichen Gefäßbündeln: Prototyp bioanaloger Nanoaktuatoren). Einige Erfahrungen in der Entwicklung bionisch inspirierter Implantate und biokompatibler Sensorik (z.B. Mundwerkzeuge eines Gliedertiers – Mikrogreifer, Beingelenk einer Jagdspinne – nachgiebiges hydraulisches Gelenk, Mittelohrimplantat, Meßfixateur als experimentelle Basis bionisch optimierter Frakturbehandlung) ließen ein großes Entwicklungspotential in Kombination mit dem Technologiebereich „Mikrosystemtechnik“ erwarten, so dass ein intensiver Abgleich und Austausch mit dem Kernkompetenzbereich „Mikrobionik“ erfolgen sollte.

Prof. Witte hatte im DFG-Schwerpunktprogramm “Autonomes Laufen” die Gewinnung von Daten und den Transfer von Prinzipien aus der Bewegungsanalyse von Säugetieren auf die vierbeinige Laufmaschine „BISAM“ des FZI –Karlsruhe koordiniert. Die Bundesrepublik Deutschland hat von 1997 bis 2002 den Transfer biologischer Prinzipien in die Robotik mit min. 10 M€ gefördert. Das DFG –Schwerpunktprogramm „Autonomes Laufen“ hatte nach Einschätzung internationaler Experten im Jahr 2001 die internationale Spitzenposition in diesem Forschungsfeld erreicht. Bereits im Jahr 2002 zeigten die japanischen Kollegen, wie man die in Deutschland entstandenen Ideen und gemäß den Förderrichtlinien publizierten Erkenntnisse schnell und effizient produktnah umsetzen kann. Angesichts der damaligen Forschungssituation plante und veranstaltete das Fachgebiet Biomechatronik eine der wichtigsten internationalen Konferenzen zur bionisch inspirierten Robotik: „Adaptive Mechanics in Animals and Machines“ AMAM 2005, zu dem das BIOKON als Mitveranstalter einlud.

Bionik war und ist ein immanenter und explizierter Bestandteil der Ausbildung „Biomechatronik“ des Studienganges „Mechatronik“ an der TU Ilmenau. Im Vorfeld des Projektes wurde ein gegenseitiger Lehrexport zum Thema Bionik mit: Prof. Speck (Freiburg), Prof. Kesel (Bremen), Prof. Hill (Münster), Dr. Rossmann (Darmstadt) und Dr. Gorb (MPI Stuttgart) abgesprochen. Hierdurch sollte die Bionik-Ausbildung an den jeweiligen Standorten durch Kernkompetenzen der Gastreferenten gestärkt werden und gleichzeitig eine intensivere Vernetzung im Lehrangebot stattfinden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

I.5.1 Regionale, nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten des Fachgebiets Biomechatronik in Forschung und Lehre stützten sich hinsichtlich der biologisch-medizinischen Grundlagenforschung auf diverse fakultätsübergreifende Kooperationen mit Jenenser Instituten, hinsichtlich der Technologie auf fakultätsübergreifende Kooperationen mit Ilmenauer Instituten. Besonders hervorzuheben ist die Beteiligung am Kompetenzzentrum Interdisziplinäre Prävention KIP (Jena).

Unkomplizierter Zugang bestand zu den Einrichtungen des Zentrums für Mikro- und Nanotechnologien (ZMN Ilmenau), des Textilforschungsinstituts Vogtland e.V. (TITV) in Greiz und des Forschungszentrums für Molekulare Biotechnologie (fzmb) Bad Langensalza inkl. der angeschlossenen Tierklinik.
Nationale und internationale Kontakte entstanden projektbezogen zur Universität Gießen, Institut für Botanik; Fraunhofer Institut IMB, Abt. Molekulare Biotechnologie, Schmallenberg; Institut für Bioprozess- und Analysemesstechnik iba e.V., Bad Heiligenstadt; European Molecular Biology Lab. (EMBL) Heidelberg; Universität Frankfurt am Main, Dr. Senckenbergische Anatomie (PD Dr. Gertrud Klauer); Technische Universität Budapest; EPFL, Lausanne; The University of Liverpool; McGill University, Montreal; University of Electro-Communications, Tokio.

I.5.2 Zusammenarbeit innerhalb des BIOKON

Stabile und effiziente Kontakte bestanden zum Beginn der Förderung bereits mit den Gruppen in Saarbrücken (Prof. Nachtigall / Herr Braun), Bremen (Prof. Kesel), Münster (Prof. Hill), Darmstadt (Prof. Tropea / Dr. Rossmann), Freiburg (Prof. Speck). Mit diesen wurden auf kurzem Wege Forschungsergebnisse ausgetauscht. Allen weiteren BIOKON-Partnern wurden bei sich bietender Gelegenheit potentielle Industriepartner vermittelt.

Anlässlich der BIOKON-Konferenz im Juli 2003 im Ökotechnischen Zentrum Nieklitz wurde eine Bestandsaufnahme der existierenden und geplanten HS-Lehrprogramme zur Bionik unternommen, welche die jeweiligen Schwerpunkte und noch bestehenden Disponibilitäten für eine bundesweite Abstimmung offenbarte. Mit der zu erwartenden Zunahme der BIOKON –Standorte und ihrer Bionik-Aus- und Weiterbildung bestand die Notwendigkeit der gegenseitigen fachlich-inhaltlichen und methodischen Abstimmung. Die logistischen Möglichkeiten gegenseitiger Referentenbesuche wurden flankiert durch netzseitig übermittelte Lehrinhalte über verschiedene interaktive Medien. Die gemeinsame Arbeit an einem empfohlenem Lehrprogramm mit ausgewogenem Inhalt und dessen Publikation, auch zugeschnitten für die berufliche Qualifikation von Entwicklern und Ingenieuren in der beruflichen Praxis sollte sich daran anschließen.

Besonders mit Prof. Hill (Münster) wurde die Netz-bezogene Systematik (s.w.u.) und Methodik der bionischen Umsetzung weiterentwickelt. Unter Führung durch Herrn Boblan (Berlin) diente dies dem Ausbau der inneren Struktur des „Lösungsfinders“ im Internetportal. Auf dem Gebiet der Aus- und Weiterbildung stellten wir uns dem gemeinsamen Ziel, didaktisch methodisch Ansätze zu Bionik zu erfassen, zu analysieren und zu systematisieren. Daraus schloss sich die Entwicklung und Konzipierung einer Didaktik und Methodik der Bionik an (siehe II.1.3.1 Fachgruppenarbeit (A2)). In Zusammenarbeit mit Prof. Hill und der Fachgruppe A2 (s.u.) im BIOKON-Projekt konnte im Berichtszeitraum das Schulbuch "Bionik - Lernen von der Natur" - erschienen im PaeTec-Duden Verlag fertig gestellt werden.

Weitere Kooperationen bestanden zu Prof. von Gleich an der Univ. Bremen /FG Produktionstechnik, Dr. Dehnhardt an der Ruhr-Universität Bochum und Prof. J. Schmitz an der Uni Bielefeld. Ein wesentliches Ergebnis der Arbeit mit Prof. von Gleich war die gemeinsame Erstellung des Endberichtes des vom BMBF geförderten Vorhabens „Trends und Potentiale der Bionik“, der 2007 als Einzelband publiziert wurde.
Des weiteren erfolgte die Mitarbeit in folgenden Gremien des BIOKON:

- Vorstandsmitgliedschaft in der Forschungsgesellschaft Bionik e.V. (BIOKON)
- Leitung der Thematischen Fachgruppe B5 „Biomechatronik, Biomedizintechnik, Mikrosystemtechnik, Aktuatorik, Robotik“
- Ständige Teilnahme an der Fachgruppe A2 (s.u.)

Während der gesamten Projektlaufzeit beteiligte sich der Standort Ilmenau mit Beiträgen zur grundlegenden Netzwerkarbeit und zur thematischen Facharbeit. Die eingehende Darstellung dazu findet sich in II. 1.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

II.1.1 Recherchetätigkeit

Im Rahmen der Scoutfunktion des Standortes Ilmenau wurden im Sinne der Zielstellung folgende Projekte recherchiert, aufgearbeitet und im Internet veröffentlicht:

Kernkompetenz: „Mikrobionik, Bionik der Mikrosysteme“

- Antifouling - neue biomimetische Konzepte
- Bioadhäsion - proteinbasierte Klebstoffe
- Bio-Solarzelle
- Der Gecko an der Wand - Kleben ohne Nebenwirkungen durch Adhäsionskräfte
- Der Lotuseffekt - Selbstreinigende mikrostrukturierte Oberflächen nach dem Vorbild der Natur
- Der Mottenaugeneffekt - Von der "unsichtbaren" Glasscheibe
- Die Klette - Eine Alternative zum Schnürband mit vielen Einsatzmöglichkeiten
- Elektronische Hochleistungs-Nase mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten
- Energiesparende Fortbewegung - inspiriert von den Bauchschuppen der Schlangen - Einsatz im Langlaufbereich
- Haftsysteme - Kann die in der Natur beobachtete erstaunlich starke Anhaftung auch in der Technik erreicht werden?
- Infrarotsensoren bei Schlangen - Vorbild für Medizin und Datenübertragung
- Mikrogreifer - Die "Evolution" der Mikrohand
- Mikroförderpumpe - für hochviskose Medien
- Mikromechanik - Schnelle Bewegungen bei Pflanzen durch effiziente Energiespeicherung
- Mittelohrimplantat - "Ein Getriebe im Kopf", Beispiel für Mikromechanismen in der medizinischen Anwendung
- Selbstreinigender Mikrosensor - Mikrosensor für die elektrische Leitfähigkeit in natürlichen Wässern mit bionischen Selbstreinigungsmodul
- Strömungssensoren von Fischen - Vorbild für Unterwasserfahrzeuge

- Ultradünne Kamera - Ein neues Bilderfassungssystem basierend auf künstlichen Facettenaugen
- Verbundwerkstoffe - Meeresschnecke als Pate für neue Materialien
- Von Muskeln und Motoren - Zur Bionik der Bewegungssysteme
- Weniger Reibungsverluste durch Haifischhaut - Vorbild für Metalle und Schwimmanzüge

Kernkompetenz: „Biomedical Engineering“

- Bioadhäsion - proteinbasierte Klebstoffe
- Biomimetische Keramiken - neues Material für Implantate
- Die Klette - Eine Alternative zum Schnürband mit vielen Einsatzmöglichkeiten
- Elektroschocks - Vom Zitteraal abgeschaut
- Herz- und Gefäßchirurgie - die Nadel mit dem Lotuseffekt
- Infrarotsensoren bei Schlangen - Vorbild für Medizin und Datenübertragung
- Leichtbau im Körper - Der Knochen als Vorbild für Kräne und Gerüste
- Mittelohrimplantat - "Ein Getriebe im Kopf", Beispiel für Mikromechanismen in der medizinischen Anwendung
- Myoelektrische Handprothese - Mechatronik verbessert die Lebensqualität behinderter Menschen
- Prothesen für untere Extremität - Quantensprung in der Entwicklung der Beinprothetik
- Spinemover - einen Stuhl, der dem Rumpf und Rücken eines Menschen durch die Sitzfläche Bewegung wie beim Gehen aufprägt

Kernkompetenz: „Bionisch inspirierte Robotik“

- Aerodynamik in der Tierwelt – Pinguin vs. Tropfen
- Biomechanik des Spinnenbeins
- Das Morse ABC der Delphine
- Der Insektenflug - Insekten sind Flugkünstler am Himmel. Ihre Wendigkeit und Ausdauer dient als Vorbild für Flugroboter.

- Echoortung - Fledermäuse als Vorbild
- Haftsysteme von Gliedertiere - Kann die in der Natur beobachtete erstaunlich starke Anhaftung auch in der Technik erreicht werden?
- Insekten als Vorbild für Laufroboter
- Insektensensorik - Vorbild für Sensoren in der Technik
- Leichtbau im Körper - Der Knochen als Vorbild für Kräne und Gerüste
- Mehr Sicherheit im Flugverkehr durch Rückstromtaschen - nach dem Vorbild des Vogelfluges
- Mikrogreifer - die "Evolution" der Mikrohand
- Robosnail - ein Roboter erklimmt Wände
- Strömungssensoren von Fischen - Vorbild für Unterwasserfahrzeuge
- Tastsysteme für Roboter - nach dem Vorbild der Insekten
- Von Muskeln und Motoren - zur Bionik der Bewegungssysteme
- Vögel als Vorbild für effizientes Fliegen – Von Winglets zum Split-Wing-Loop

Beiträge der AMAM 2005

- Boblan, R. Bannasch, A. Schulz and H. Schwenk
  A Human-like Robot Hand and Arm with Fluidic Muscles
- F.Palis, U.Schmucker, A.Schneider, V.Rusin, Y.Zavgorodniy
  Adaptive Multi-Legged Robot with Articulated Body
- G. Gomez , A. Hernandez Arieta , P. Eggenberger Hotz1 , R. Pfeifer:
  An adaptive learning mechanism for teaching a robotic hand to grasp
- Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya
  Autonomous walking of a biped robot driven by nonlinear oscillators
- Menciassi, G. La Spina, S. Gorini, P. Dario
  Bio-inspired robotic worms for locomotion in unstructured environments
- Behn and K. Zimmermann
  Biologically inspired Sensors with Adaptive Control
- DaeEun Kim and Ralf Möller
  Biomimetic Whisker Experiments for Tactile Perception

- Tao Geng, Florentin Wörgötter:
  Biped Robot under Control of A Novel Reflexive Network
- S. Klug, B. Möhl, O. von Stryk and O. Barth
  Design and Application of a 3 DOF Bionic Robot Arm
- Koh Hosoda, Takashi Takuma and Masayuki Ishikawa
  Design and Control of a 3D Biped Robot: Actuated by Antagonistic Pairs of Pneumatic Muscles
- U.Schmucker, A.Schneider, F. Palis, V.Rusin, Y.Zavgorodniy
  Force Sensing for Walking Robots
- Sven Behnke
  Human-Like Walking using Toes Joint and Straight Stance Leg
- Dirk Spenneberg
  Learning Spatial Categories on the Basis of Proprioceptive Data
  (An Experiment in Embodied Cognition)
- J. Albiez, T. Hinckel and R. Dillmann
  Reactive Foot-Control for Quadruped Walk
- A. Spröwitz and L. Berthouze
  Robust robot bouncing: Passive compliance and flexible phase locking
- A. Ishiguro, M. Shimizu, and T. Kawakatsu
  Slimebot: A Modular Robot That Exhibits Amoebic Locomotion
- Heiko Wagner, Peter Giesl, Reinhard Blickhan
  STABILITY OF MOVEMENTS
- Axel Schneider, Holk Cruse, and Josef Schmitz
  Switched Local Positive Velocity Feedback controllers: How to generate retraction forces and inter-joint coordination locally during the stance phase of walking legs?
- F. Iida, Y. Minekawa, J. Rummel and A. Seyfarth
  Toward a Human Like Walking Robot with Compliant Legs
- K. Zimmermann and I. Zeidis
  Worm-like Locomotion. Ways of Realization: Non-symmetric Friction and application of Ferrofluids

II.1.2 Bearbeitung von Anfragen und Kontaktvermittlung zum Thema Bionik

Als Mitglied im Kompetenznetzwerk BIOKON hatten das Fachgebiet Mikrosystemtechnik und in Nachfolge das neugegründete Fachgebiet Biomechatronik an der TU Ilmenau die Aufgabe, ihre fachspezifischen Kompetenzen zu popularisieren, Interessentenmeldungen an bionischen Lösungen, die als Reaktion darauf erfolgten, zu sammeln und potentielle Partner aus Forschung und Anwendungspraxis zu vermitteln.

An drei Beispielen sollen Inhalt, Strategie und Stand der Kooperationsarbeiten dargestellt werden, um die Wirkung des Netzwerkes zu illustrieren:

- Das Beispiel F&E-Projekt „Forisom“ ist ein Forschungsverbund biologischer mit mikrotechnischer Einrichtungen, deren Ergebnis zu einer Applikation biogener Molekülaggregate als Komponenten in fluidischen Mikrosystemen führt.
- Die Kooperation mit den KMU-Firmen CeSys GmbH und LTF GmbH zeigen Anwendungen spezieller bionischer Lösungen, die unmittelbar vor der Produktionsreife stehen: eine hydraulisch gesteuerte Manipulatorstruktur nach dem „Vorbild“ des Spinnenbeins bzw. die Führung (bio-)chemischer Reaktionen in einem mitteln neuer Technologie hergestellten modularen Fluidsystem.
- Die Verbindung, die mit dem Forschungsinstitut TITV Greiz geschaffen wurde, dokumentiert eine weitere Qualität biologisch-technischer Integration, die nicht auf ein einzelnes umzusetzendes Objekt beschränkt bleibt, sondern einen gesamten Bereich, den der Textilbionik einbeziehen und weiterentwickeln soll.

Weitere erfolgreiche Vermittlungs- und „Kontaktanbahnungs“-Leistungen, die zum großen Teil auch mit moderierender Begleitung und fachsprachlich translativer Zuleistung in der Antragsphase von Fremdprojekten wurden erbracht, die zu einem nicht unbedeutenden Teil auch bewilligt wurden. Dies wurde schon in den BIOKON-Internetseiten unter Beachtung von Firmeninteressen popularisiert. Gemäß einer altruistischen Intention der auf gesellschaftliche Synergien setzenden Gründungsinitiatoren (Prof. Nachtigall und Prof. Hansen), auch Vermittlungsarbeit zwischen Partnern aus biologischer Forschung, technischer Entwicklung und industrieller Umsetzung zu leisten, wurden die meisten Förderungen nicht für die eigene Einrichtung mittelwirksam. Quantitativ nicht

mehr zu erfassen sind die Anfragen zu Detailproblemen seitens interessierter Firmen verschiedenster Branchen, die zuweilen den Charakter eines Consulting annahmen, von Besuchern unseres Messe-Gemeinschaftsstands, die Bitten um Zuarbeit und Literaturhinweisen von auswärtigen Doktoranden, Diplomanden und Studenten, Schüler- und Lehreranfragen zu Unterrichtsinhalten der Bionik und nicht zuletzt die Ansprüche seitens der Medien.

Beispielhaft sind folgende Anfragen aufgeführt, die zum Thema Bionik von der TU Ilmenau bearbeitet wurden:

- Siemens Medical Solution bekundete Interesse an einer Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau
- Anfrage zur Rasenmäherbionik
- Anfrage von WMF zur Geometrie und dem Aufbau des Haifischzahnes
- Anfrage zu bionischen Mikrogreifern (von Thomas Hausner, Karlsruhe)
- Anfrage zu Kontakten in der Bionisch Inspirierten Robotik (von Korbinian Trumpp)
- Anfrage zu einer bionisch inspirierten Fischscheuche
- Zuarbeit zur Broschüre „Vitalitätsimpuls – Existens und Energie“, herausgegeben vom BMBF (2004)
- Anfrage zur „Bionik der Schreibgeräte“ (Fa. Staedler)

Folgende Kontakte kamen auf Initiative der Vermittlungsarbeit des Standortes Ilmenau im Berichtszeitraum zustande:

- Frau Prof. Kesel und Frau Dr. Klauer (Mechanosensorik biologischer Systeme)
- Herr Dr. Zerbe, TU Ilmenau und Frau Dr. Klauer (Zusammenarbeit bei der Simulation und Entwicklung von Mechanosensoren)
- Dipl.-Ing. R. Volkert, TU Ilmenau und Dipl.-Ing. I. Boblan, TU Berlin (Roboterarm mit Festo-Muskeln)
- Prof. Copf und Prof. Grabow (führte zu einem slowenischen Patent, welches derzeit zur EU-Anmeldung anhängig ist)

In Kooperation mit Prof. Scherge wurde Frau Prof. Kesel das Angebot gemacht, das Ilmenauer Tribologielabor zur Untersuchung des Ablösemechanismus von Spinnenbeinen zu nutzen. Auch hieraus können in Zukunft weitere interessante Projekte entstehen.

II.1.3 Ergebnisse der grundlegenden Netzwerkarbeit

II.1.3.1 Medien, Internet, Datenbanken, Öffentlichkeitsarbeit, Presse (A1)

Der Standort Ilmenau hat sich im Projektzeitraum darauf konzentriert, die vorhandenen Rechercheergebnisse (s.o.) zu den drei Kompetenzfeldern Bionik der Mikrosysteme, Biomedizinische Technik und Bionisch inspirierte Robotik öffentlichkeitswirksam darzustellen. In diesem Rahmen wurde kontinuierlich an der Internetseite des Standortes gearbeitet (www.tu-ilmenau.de/bionik). Die Beiträge des „3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines (AMAM)“ wurden ebenfalls aufgearbeitet und sequentiell auf den Seiten ergänzt. Zugrunde liegt das Content Management System Typo 3. Der Entwicklung einer leicht zugänglichen Darstellungsstruktur folgten eine kontinuierliche Aktualisierung und Erweiterung der nationalen sowie internationalen Forschungsergebnisse in der Bionik für die Interessenten aus der Forschung und Wirtschaft, sowie für die interessierte Öffentlichkeit. Ergänzend dazu wurde an einer Datenbank gearbeitet, die alle Rechercheergebnisse zusammenfassen und der Fachöffentlichkeit zugänglich machen soll. Hierfür besteht eine Verknüpfung mit den wissenschaftlichen, in digitaler Form archivierten Schriften und eine Volltextsuche in Entwicklung. In der Datenbank wurden die fachlich auf die Ilmenauer Kompetenzfelder zugeschnittenen Rechercheergebnisse eingearbeitet.

Als ein weiteren Beitrag für die medial-basierte Zusammenarbeit und Vernetzung bionischer Kompetenzen wurde das CMS „Analogiesucher“ generiert und der BIOKON-Gemeinschaft vorgestellt. Die Idee eines „Analogiesuchers“ wurde aus dem Vorschlag seitens des Förderträgers, einem „Lösungsfinder“ gemeinsam zu erstellen, abgeleitet (siehe II.4.3).

Zu der im März 2005 ausgestrahlten WDR-Sendung „Bionik - der große Bluff der Wissenschaft“ (Beitrag von Peter Ehmer) hat Dr. Schilling eine Stellungnahme ausgearbeitet, mit dem Vorschlag, diese auf der zentralen BIOKON-Seite zu veröffentlichen.

Im August 2005 beteiligte sich der Standort Ilmenau an Expertentreffen und der Expertenbefragung „Bionik als Technologievision der Zukunft“ des Fraunhofer-Institutes für Umwelt- und Energietechnik (UMSICHT).

Zu der im September 2005 stattgefundenen AMAM wurden zahlreiche Berichte und Beiträge im Radio/TV bzw. Internet gesendet oder veröffentlicht (u.a. 3sat-nano, ARD-Tagesschau, DLF-Forschung Aktuell, CT-HeiseTicker, Technology Review-Robotik).

II.1.3.2 Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik (A2)

Technische Biologie ebenso wie die Bionik waren bisher Bestandteile im Diplomstudiengang Biomechatronik an der TU Ilmenau. Mit der Umstellung auf Bacchelor/Master werden diese beiden Themen zusätzlich im neuen BSc-Studiengang Biomedizintechnik integriert sein. Ebenfalls vorgesehen ist eine Vertiefung des „Bionik-Angebotes“ in den Masterstudiengängen Biomechatronik und Biomedizintechnik.

Den Ilmenauer Studenten wurde das BIOKON über die gemeinsame Netzpräsenz vorgestellt und die Bionik näher gebracht. Das vielfach entstehende „bionische“ Interesse wurde und wird in Studien-, Projekt- und Diplomarbeiten zu verschiedenen Aspekten der Bionik vertieft. Neben diesen studentischen Arbeiten wurden auch Schüler hiesiger Gymnasien bei unterschiedlichen Arbeiten betreut und auf diesem Weg mit der Bionik vertraut gemacht.

Ausgehend von einer vom Standort Ilmenau (BIOKON I) moderierten „Lehr-Modul“-Besprechung an der ZMTW-Stiftung Nieklitz 2003 (Leitung Prof. Heydemann) wurde sich in Zusammenarbeit mit dem Standort Münster (Prof. Hill) und den anderen in der Ausbildung Engagierten zur Didaktik einer systematischen Vermittlung bionischer Forschungsinhalte in der akademischen Lehre, der postgradualen Weiterbildung, des be-

rufsbildenden und schulischen Unterrichts wie auch zu Erfüllung des populärwissenschaftlichen Auftrags durch den Förderträger abgestimmt. Derzeit sind mindestens 13 Hochschulstandorte in der Lehre mit bionischen und bionik-relevanten Themen (z.B. Ökotechnologie) bzw. an deren Aufbau aktiv. Das Hauptmotiv des Austausches ist , dass sich jeder Bionik-Standort seinen eigenen Studienplan – entsprechend des jeweiligen fachlichen Profils - erstellt. Neben einem aufwandoptimierenden Effekt eines nicht nur in sporadischer Kooperation bestehenden Austausches über Erfahrungen und Vorarbeiten in der Programmatik fanden sich Möglichkeiten einer das Ausbildungsspektrum bereichernde Zielsetzung durch die inhaltliche Unterstützung bei Zusammenführung der jeweiligen Fachkompetenzen über einen Austausch von Lehreinheiten (als Praktikum-Angebote, Ringvorlesungen, verfügbare Präsentationen und Lehrmittel).

Von beteiligten Vertretern der Standorte der Lehre wurden in der Projektlaufzeit die jeweiligen Ausbildungsangebote sowie Bemerkungen zu Konzeption und zeitliche Struktur des Studienganges dargelegt. Es entstand dabei eine Übersicht, die den Vergleich der im jeweiligen Studienprogramm explizit verzeichneten Sachgebiete der Bionik ermöglicht. Bei dieser Ist-Stand-Analyse ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Bionik-Ausbildung an der verschiedenen Standorten ist deutlich diversifiziert infolge der verschiedenen Zielgruppen (Ingenieur-, Naturwissenschafts-, Lehramtsstudenten oder Studenten der Angewandten Künste) mit ihrem speziellen Wissenshintergrund, der unterschiedlichen Zeitskalen und Abschlüsse, der sachlogischen Einbindung im Studienprogramm, der vom Forschungsprofil bestimmten und der infrastrukturellen Voraussetzungen.
- Es soll gerade mit einem sehr integrativ angelegten Fach wie die Bionik gegen eine zu starke Spezialisierung in vielen Bildungsgängen bei den Absolventen die Fähigkeit gesetzt werden, ein generalistisches Wissen zu erwerben und selbstständig zu strukturieren und in einen nicht prognostizierbaren Anforderungs-Kontext integrieren. Das muss nicht im Widerspruch zu der Forderung stehen, die Ausbildung mit einem „guten Handwerk“ zu fundieren.
- Innerhalb der Bionik gibt es Themen, die von fast allen Lehrstühlen geboten werden (z. B. Material-Bionik /Werkstoffwissenschaften und die Biomechanik i. w. S., Optimierungsverfahren). Diese sind auch als essentiell für ein Studienprogramm

„Bionik“ anzusehen, müssen jedoch möglicherweise durch bisher weniger präsente Themen noch ergänzt werden. Hier wäre eine gewisse Standardisierung durch Abgleich sinnvoll. Andere Lehrinhalte, wie Didaktik der Bionik, Ökotechnologie, bionisches Design, Bionik der Mikrotechnik sind sehr standortspezifisch geprägt und nur vereinzelt im Lehrprogramm explizit ausgewiesen, könnten aber als Module aufbereitet werden und den anderen Lehrkräften im Sinne einer Verbreiterung des Grundwissensspektrums zur Verfügung gestellt werden.

- Eine Auffüllung mit speziellen Kompetenzen ist besonders dort hilfreich, wo es sich um zukünftig an Relevanz zunehmende Fächer handelt (z.B. Ökotechnologie, adaptive Materialien, Bionik i. d. Nanotechnologie)

Als Gegenstand weiterer Kooperationen ergaben sich:

1. Ideen, praktische Vorschläge und Absprachen zum bi- und multilateralen Austausch von Lehrinhalten und -materialien mit baldiger Wirksamkeit
2. Diskussionsbeiträge zu bewährten Formen der Vermittlung der Bionik als Denkweise, Aspekten der Didaktik und Methodik der Lehre bionischer und biotechnischer Inhalte, z.B. des Austausches über die praxisnahe Vermittlung heuristischer Schritte in der Übertragung biologischer „Vorbilder“ in technische Lösungen.
3. Wege einer Rückkopplung aus der Industrie (Bedarfs-Ermittlung) durch Absolventen-Kontakte und Austausch über Entwicklungslinien, die von Industrie-Forschern dargestellt werden.

In Verbindung mit dem DAAD-Programm „Akademischer Aufbau Süd-Osteuropa“ wurde durch Dr. Schilling im Mai 2005 an der TU Maribor (Slowenien) neben Abstimmungen zu gemeinsamen Lehrveranstaltungen das BIOKON vorgestellt und ein gemeinsames Forschungsthema vereinbart („Einsatz von faseroptischer Sensorik zur Kontrolle biomechanischer Systeme“).

In Zusammenarbeit mit dem Standort Münster (Prof. Hill) wurde im November in Berlin das Thema „Methodik und Didaktik der Bionik – Entwurfsalgorithmen und Systematik“ für die Lehrmittelerstellung zur Bionik unterbreitet. Das Ergebnis, ein Analogiesuche-

Programm, sollte Interessenten innerhalb und außerhalb des BIOKON zur Verfügung stehen (z.B. unter www.biokon.net).

Aus den mehrjährigen Erfahrungen mit Bionik-Vorlesungen für die Studenten der TU Ilmenau und der Ergebnisse des Austausches mit Lehrverantwortlichen anderer Bildungseinrichtungen wurden Konzepte zur Didaktik und Methodik bis hin zu detaillierten Lehrprogrammentwürfen für verschiedene Zielgruppen erstellt. Außerhalb des BIOKON wurden diese dem Thüringer Bildungsinstitut ThILLM Bad Berka im Rahmen der Weiterbildung der Landesfachberaterschulung für Naturwissenschaften vorgestellt. Eine weitere Popularisierung des gemeinsamen Ausbildungskonzeptes erfolgte auf der Sommerakademie „Bionik und Nachhaltigkeit“ der Deutschen Bundesumweltstiftung DBU 2006 (siehe auch II.4.2). Im Juni/Juli 06 fanden dazu zwei Vorträge auf dieser Tagung der DBU in Görlitz (Org. Prof. HEYDEMANN) zu „Biomechatronik u. Bionik“ bzw. „Lehr- u. Informationsprogramm für Biologen und Ingenieure“ (Dr. Schilling, zus. m. Prof. Witte bzw. Prof. Hill) statt.
Des Weitern wurden im Rahmen des FG-Treffens A2 (März 2006) ein eigenes Bionik-Lehrprogramm vorgestellt und gemeinsame Publikationen mit anderen Standorten abgestimmt.

In Zusammenarbeit mit Prof. Hill und der Fachgruppe A2 im BIOKON-Projekt konnte im Berichtszeitraum das Schulbuch "Bionik - Lernen von der Natur" - erschienen im PaeTec-Duden-Verlag fertig gestellt werden.

Im Rahmen der „Sommeruniversität“ 2006 an der TU Ilmenau wurden Schülergruppen aus Gymnasien durch Vorlesungen und experimentellen Aufgaben, die durch die Mitarbeiter des Fachgebiets betreut wurden, mit der Bionik vertraut gemacht.

II.1.3.3 Ausstellungen, Messen, Kongresse, Workshops, Tutorials (A3)

II.1.3.3.1 AMAM 2005, Ilmenau

Das 3rd International Symposium on Adaptive Motion and Machines AMAM 2005 wurde vom 26. bis 30. September in Ilmenau (Thüringen) durchgeführt. Nach der Eröffnungsveranstaltung am 26. September 2005 wurden an den darauf folgenden fünf Kongresstagen präsentiert:

- 13 Keynotes
- 34 Vorträge
- 53 Poster (davon 13 BIOKON-Poster, von den Standorten TU Ilmenau, RWTH Aachen, FZI Karlsruhe, Uni Tübingen, Uni Freiburg & ITV Denkendorf, Hochschule Magdeburg)
- 23 Roboter (incl. 8 Laufroboter und 3 Humanoide, davon 4 von BIOKON-Partnern)

Diese Präsentationen wurden mit 180 registrierten Teilnehmern (139 mit 16 verschiedenen Nationalitäten von extern und 41 von der Technischen Universität Ilmenau) diskutiert. Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Tagung wurden in einem gedruckten Abstract-Booklet (ISBN: 3-938843-03-9) und auf einer CD (Beiträge in Langversion und Begleitmaterialien) publiziert.

Am 28.9.2005 wurde - in die AMAM eingebettet - an einem „BIOKON-Day“ der interessierten internationalen Fachöffentlichkeit (Teilnehmer und Besucher) das deutsche Bionik-Kompetenznetzwerk BIOKON e.V. mit Vorträgen, Postern und einer Seminarveranstaltung vorgestellt. Die Keynotes hielten Prof. Nachtigall (Saarbrücken), Prof. Pfeifer (Zürich) sowie Dr. Bannasch (Berlin). Am Nachmittag veranstaltete die Arbeitsgruppe Ilmenau das 3. FG-Treffen B5 „Biomechatronik, Robotik, Sensorik“ mit einer abschließenden Diskussionsrunde (inhaltliche Information siehe II.1.4.1).

Ebenfalls am 28.9.2005 fand ein Roboter-Wettbewerb statt. Alle Maschinen hatten eine Serie von Aufgaben zu erfüllen, welche von einer international besetzten Jury vorgegeben wurde. Die Konstrukteure bekamen auch Gelegenheit, die besonderen Fähigkeiten ihrer Maschinen zu demonstrieren. Einen der Preise („BIOKON e. V. – Preis“) gewann TARRY - die sechsbeinige Maschine der Universitäten Bielefeld und Duisburg.

Hervorzuhebende Ergebnisse

In den Beiträgen wurde ein beeindruckender Stand der Entwicklung prototypischer Systeme bionisch inspirierter Robotik dokumentiert. Prof. Martin Bühler (vormals McGiII University, jetzt Boston Dynamics Inc.) konnte anhand der von der DARPA finanzierten Entwicklung vierbeiniger Roboter in Ziegengröße die industrielle Umsetzbarkeit der Konzepte belegen. Die Tatsache, dass sich keines der großen deutschen Industrieunternehmen zu einer Sponsorship für die Konferenz durchdringen konnte, andererseits große japanische Unternehmen als interessierte Zuhörer auftraten und vier der fünf offiziellen Preise des Roboterwettbewerbes von einer DARPA-finanzierten Maschine gewonnen wurden, dokumentiert deutlich: Europas Industrie verschläft eine Technologieentwicklung. Diese Beobachtung stimmt umso trauriger, als dass der einhellige Tenor auf der AMAM 2005 war, dass die Bionik in Deutschland weltweit führend ist - an den wissenschaftlichen Grundlagen für technische Entwicklungen mangelt es nicht.
Dabei ist hervorzuheben, dass auf der AMAM 2005 der Trend wieder stärker von den hochkomplexen mechatronischen Systemen zu smarten Systemen mit intrinsischer mechanischer Intelligenz gewechselt hat.

II.1.3.3.2 Hannover Messe

Im Jahr 2005 hat sich der BIOKON Standort Ilmenau im Rahmen der Hannovermesse 2005 auf dem gemeinsamen Informations- und Demonstrationstand aller BIOKON - Partner präsentiert. Unter dem Arbeitstitel "Textil-Bionik und Binnendruck-gesteuerte Mechanismen" wurden zwei Exponate mit erklärenden Postern ausgestellt:

- Prinzip Libellenflügel: Textile Struktur mit einstellbarer Steifigkeit
- Prinzip Spinnenbein: Manipulatoren mit einstellbarer Nachgiebigkeit

Auch im Jahr 2006 hat sich der BIOKON Standort Ilmenau im Rahmen der Hannovermesse auf dem gemeinsamen Informations- und Demonstrationsstand aller BIOKON-Partner vorgestellt.

Aufgrund des hohen Zukunftspotentials der Mikrosystembionik wurden Entwicklungsreihen verschiedener bionisch inspirierter Mikrosysteme von der Idee zum Produkt dargestellt:

- Mikrogreifer als Manipulator mit hohem Freiheitsgrad
- Mittelohrimplantat - ein Beispiel für mikrotechnische Produkte in der Implantologie
- Peristaltische Pumpe für hochviskose Medien
- Aktiv sich selbstreinigender Sensorchip für die Umweltmesstechnik
- Fluidisch angetriebene nachgiebige Manipulator-Finger aus Silikon-Polymer

Im Rahmen des Schwerpunktes Textilbionik wurden Ergebnisse von Untersuchungen zur Entwicklung von textilbasierten Aktuatoren und Sensoren für die Biomechatronik vorgestellt. Das Exponat „Peristaltisch fördernder druckgetriebener Schlauch mit textiler Hüllstruktur“ zeigt auf der Basis textiler Materialien hergestellte nachgiebige Mechanismen mit fluidischem Antrieb (TITV Greiz , Dr. C. Schilling, Dipl.-Ing. I. Gavrilova). Dazu wurde eine Gebrauchsmusterschutz-Schrift im Vorlauf eines Patentierungsverfahrens eingereicht. Die Fortführung der Idee in einem Umsetzungsbeispiel wurde auf der internationalen Fachmesse „Ideen-Erfindungen-Neuheiten“ (IENA) am 03. November 2007 mit einer Bronzemedaille prämiert. Weiterhin wurde eine Zusammenstellung eines Fluid-Systems als Demonstrator aus mikrostrukturierten Glas nach dem Prinzip des Intrazellulären Transports vorgestellt (Firma LTF GmbH, Ilmenau – Dr. Frank) erstellt.

Im Jahr 2007 hat sich der Standort Ilmenau ebenfalls auf der Hannovermesse präsentiert. Im Rahmen des Schwerpunktes Textilbionik wurden Ergebnisse der Zusammenarbeit TU Ilmenau und Textilforschungsinstitut in Greiz von textilbasierten Aktuatoren und Sensoren für die Biomechatronik vorgestellt. Das Exponat „Bionisch inspirierte sensorisierte Textilflächen“ zeigt auf der Basis textiler Materialien hergestellte nachgiebige Mechanismen mit dehnbaren fadenförmigen Sensoren und fluidischem Antrieb (TITV Greiz, Dr. C. Schilling, Dipl.-Ing. I. Gavrilova). Weiterhin wurde ein „Personalisiertes miniaturisiertes Lärmdosimeter“ für die Individualprävention von Gehörschäden vorgestellt. Anhand dieses umsetzungsreifen Exponates konnte demonstriert werden, dass die technisch motivierte Analyse eines Biosystems, in diesem Falle die Echtzeit-Erfassung von

Funktionsparametern des Reiz-Leitungs-Apparates des menschlichen Ohrs, neben der Intension einer bionischen Umsetzung auch zu einem Produkt der diagnostischen Medizintechnik führen kann. Medizinisch Tätigen ist das Konzept der Bionik zumeist eingängig. Die Grundstrategien beider Wissenschaftsbereiche sind komplementär. Bioniker wie Mediziner versuchen jene Lebewesen, welche Objekte ihrer Arbeit sind, erst in den für die jeweilige Aufgabenstellung relevanten Kategorien strukturell und funktionell zu verstehen, bevor sie tätig werden: technisch-konstruktiv bzw. klinisch-therapeutisch. Das, was allgemein unter Bionik verstanden wird, ist den medizinischen Wissenschaften die Strategie der rationalen Therapie, was aus den Funktionsprinzipien des Biosystems abgeleitete diagnostische Komponenten voraussetzt.

Im Verlauf der Messe konnten zahlreiche interessante Kontakte zu Firmen sowie zu universitären Forschungseinrichtungen geknüpft werden, die im Nachhinein vertieft wurden.

II.1.3.3.3 Bionik im Automobil, München

Im Februar 2005 wurde in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt (Prof. Tropea, Dr. Roßmann) ein Workshop zum Thema „Bionik im Automobil“ bei der BMW AG München organisiert. Verschiedene Referenten des BIOKON konnten in diesem Rahmen den Nutzen der Bionik für die Automobilindustrie verdeutlichen und demonstrierten die gute Zusammenarbeit der Netzwerkpartner. Der Erfolg dieses Workshops wurde besonders dadurch deutlich, dass von den beteiligten BMW-Mitarbeitern weitere „Bionik“ Workshops mit Vertiefung einzelner Aspekte gewünscht wurden. Der daraus resultierende dreitägige Kurs fand im Juni 2005 statt, bei dem der Standort Ilmenau die Moderation für einen Tag übernommen hat. Als Gesamtergebnis der Workshops konnten mehrere BMW-interne Projektanträge zur bionischen Optimierung angefertigt und den Entscheidungsträgern von BMW vorgelegt werden.

II.1.3.3.4 Bionik - Industriekongress 2006, Berlin

Im Rahmen des Bionik-Industriekongresses 2006 in Berlin wurde vom Standort Ilmenau die Session 4: „Biomechatronik: Von Mikrosystemtechnik über Bionik zur morphologischen Intelligenz – Ingenieure optimieren nach biologischen Vorbildern“ inhaltlich organisiert und koordiniert (Moderation: Prof. Witte).

In unserem eigenen Beitrag mit einer ausgeprägt interdisziplinären Co-Autorenschaft (Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Kallenbach, Prof. Dr. phil. habil. Bernd Hill, Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte) wurde seitens des Geschäftsführers der Transferstelle der Steinbeiß-Stiftung GmbH unter dem Titel „Was erwartet die Mechatronik von der Bionik ?“ an einem Fallbeispiel Aspekte der Integration bionischer Methodik in den Entwurfablauf marktfähiger Produkte hohen Integrationsgrades dargestellt.
Mechatronische Produkte zeichnen sich durch eine zunehmend größere Komplexität und Heterogenität aus. An ihrer Entwicklung sind mehrere Wissensdisziplinen beteiligt. Das Innovationspotential mechatronischer Systeme entsteht aus der Wechselwirkung von mechanischen, elektrisch/elektronischen und informations-technischen Teilsystemen. Mikro- und Nanotechnologien ermöglichen eine hohe Integrationsdichte der Module. Entwurfsziel ist ihre Optimierung als Ganzheit, was einen größeren Lösungsraum erfordert.
Es gibt keine kanonisierbare Optimalform des Konstruktionsprozesses, und es kann auch keine geben. Notwendig sind von der Aufgabenstellung abhängige Algorithmen wie die Vorgehensmodelle nach VDI-Richtlinie 2206, in dem der Allgemeine Problemlösungszyklus auf Mikroebene, das sog. V-Modell auf Makroebene und Vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte dargestellt sind. Die Entwicklungsmethodik nach VDI 2206 ist eine Basis für den flexiblen Entwurf mechatronischer Produkte. Sie bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen den Experten der verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen und gestattet es, das Innovationspotential domänen-übergreifender Zusammenarbeit zu nutzen.

Das hat Konsequenzen für die erprobten Routinen in der Entwicklungsmethodik, dem modellbasierter Entwurf, der einzusetzenden Programme und erfordert die Integration unkonventioneller Wirkprinzipien, unter anderem aus biologischen Systemen. Mit zu-

nehmender Komplexität nähern sich technische Systeme in ihrem Verhalten dem der biologischen Systeme an. Am Beispiel der Entwicklung der elektromagnetischen Antriebe für schnellschaltende Ventile am Ottomotor erweist sich das regelungsmechanische Verhalten des Skelettmuskels als geeignete Analogie.
Kriterien bionischer Umsetzung waren dabei seine Robustheit und die Fähigkeit, Nichtlinearitäten funktionell zu nutzen, der hohe Grad an Adaptivität an spezielle Einsatzbedingungen und insbesondere seine hohe Dynamik, begründet durch die interne Zwischenspeicherung der mechanischen Energie in resonanten Teilsystemen.

Die Nutzung biologischen Wissens ist kein formales Kopieren, sondern es bedarf einer Problemformulierung seitens des Ingenieurs, die bei entsprechender abstrahierender Methodik zu einer sinnvollen Analogiefindung in lebenden Systemen führt. Die vorgefundenen Wirkprinzipien im natürlichen „Vorbild“ müssen mittels technischer Formalismen in Modelle umgesetzt werden, die zum Entwurfsablauf mechatronischer Systeme kompatibel sind. Dazu bedarf es eines qualifizierten Zusammenwirkens von Vertretern beider Fachbereiche.

II.1.3.3.5 Bionik - Kongress, Bremen

Auf dem Bionik-Kongress in Bremen 2004 präsentierte sich der Standort Ilmenau mit folgenden Beiträgen:

- Vortrag: "Bionik - Heilsversprechen für die Medizin?" (Witte)
- Poster: "Ein Protein als Schalter in Mikrosystemen" (Voges)
- Poster: "Ein Beitrag zur informationstechnischen Biokompatibilität" (Müller, Lutherdt)
- Poster: "Bewegungsbionik - Zwischen Quadrupeden und Tripoden" (Mämpel, Carl)
- Poster: "Ergebnisse der Vermittlungsfunktion des Bionik-Kompetenz-Netzes am Standort TU Ilmenau" (Schilling, Kempf)

Der Standort Ilmenau beteiligte sich mit einem Poster und einem Vortrag an der Gestaltung des 3. Bionik-Kongresses „Patente aus der Natur“ in Bremen 2006.

- Poster: „Zwei Ausführungsvarianten der Peripherik taktiler Sensoren“, Carl, K. & Gavrilova, I.; Schilling, C.; Witte, H.

- Vortrag: „Ein Modell des Reizleitungsapparates unter dem Aspekt der Gestaltung von Sensorperipherien“, Carl, K. & Gavrilova, I; Feustel, M.; Scheibner, W.; Schilling, C.; Witte, H.

II.1.3.3.6 Weitere Konferenzen

Beim Workshop „ Bionik – Aktuelle Trends und zukünftige Potentiale“ in Bremen 2006 (Gastgeber. Prof. v. Gleich, gefördert vom BMBF) konnten wir zu der überaus fruchtbaren Diskussion sowohl mit den unten aufgeführten Punkten beitragen als auch unsere eigene Position zu den angesprochenen Grundfragen des Selbstverständnisses der Bionik präzisieren.

Bionik sehen wir als eine Methode zur Erweiterung des Lösungsraumes im technischen Entwurfsprozesses unter systematischer Einbeziehung biologischen Wissens. Systematische Bionik zu betrieben heißt, jene Komponenten an einem technischen System zu identifizieren, deren sinnvolle Analogisierung mit einer biologischen Erscheinung über den Weg abstraktiver Modellbildung des Struktur-Funktions-Zusammenhangs möglich ist. Bionik ist eine besondere Form der "Synektik", des "Einmal von einer anderen Seite-Sehens" eines technischen Problems in der Konstruktionslehre. Dazu kommt, dass wir zwischen einer "Fundamental-Bionik" (alle Komponenten der Technik und damit konsequenterweise auch die Gesellschaft sind - wie auch immer - nach "biologischen Prinzipien" gestaltet) und einer "Partial-" oder "Real-Bionik" unterscheiden sollten, die in Einzellösungen von biologischem Wissen inspiriert wurden und bestenfalls ein integraler Bestandteil der herkömmlichen Technik werden, die grundsätzlich abiotische Naturprozesse ausnutzt.

„Viele Wege führen zum Produkt“: der technische Entwurfsablauf ist selten eine lineare Kausalkette. Heuristisch gesehen ist der bionische Weg an Beispielumsetzungen folgendermaßen differenziert:

1. Vorbild-Objekt 1 unmittelbar zu Produkt 1 (*Lotus-Effek nach Barthlott*)
2. Vorbild-Objekt 1 zu Produkt 1a; zurück zu Vorbild-Objekt 1 zu Produkt 1b (*Vogelflügel – Lilienthal-Gleiter- adaptive Tragfläche*)
3. Vorbild-Objekt 1 zu Produkt 2 in anderem Funktionszusammenhang (*Spreizung der Handschwingen – Windkraft-Konzentrator n. Rechenberg*)
4. Vorbild-Objekt 1 ursprünglich unabhängig von Produkt 1; zurück zu Vorbild-Objekt 1 zu optimiertem Produkt 1b (*hochauflösender Fledermaus-Sonar, „Selbstheilung“ bei bruchzäher ZrO_2-Y_2O_3-Keramik*)
5. Vorbild-Objekt 1 zu Produkt 1 (*Darmmotorik - peristaltische Pumpe*) und über die analoge Grundfunktion außerdem
6. Vorbild-Objekt 2 zu Produkt 2 (*Ringelwurm - peristaltische Sonde*)

Ein weiteres Problem besteht in der Unschärfe der verwandten Begrifflichkeiten:
Es ist zu unterscheiden zwischen Termini und Attributen, die auf die Nutzung eines biologischen Prinzips abzielen, wie:
„bioanalog“,. „biomimetisch“, „biokompatibel“, „biokonform“, „bionom“, „bioinspired“, und den Bezeichnungen von Produkten, die unter unmittelbarer Nutzung des Substrats entstanden, wie: „biogen“, „biotechnologisch“, „biohybrid“, „biofunktionalisiert“, „biointegrativ“.
Nur erstere sind unter Anwendung essentieller spezifischer Kriterien der Biosysteme entstanden als:

- als Dynamisch stabilisierte Strukturen,
- unter Integration von Aktorik + Sensorik,
- als Enkapsis in verschiedenen Dimensionen,
- bei Stoffschluss und Nachgiebigkeit oder
- mit Material-intrinsischen Funktionen.

Letzteres Kriterium konnte im Verlaufe der Diskussion noch untersetzt werden, die als Thesen zu einer Bionik der Werkstoffe mit einer Identifikation werkstoff-technologisch interessanter Eigenschaften biologischer Substrate bei uns ihre Anwendung finden:

- Fähigkeit zu Selbststrukturierung (Morphogenese), Selbstreparatur (Heilung) und Mehrparameter-Optimierung (Adaptation).
- Monolithisch durch Wachstum und Ausdifferenzierung – ohne Montageaufwand
- Additive Bildung aus zellulären Grenzschichten durch einheitliche Polykondensation aus frei verkoppelbaren Grundeinheiten, die funktionell differente Substituenten tragen
- Hierarchische Binnenstruktur mit dimensionsspezifischer Funktion
- Copolymere, Komposite, Faser-Matrix-Verbunde, Laminate bilden Gradienten-Werkstoffe
- Beanspruchungsgerechte Diversifizierung durch orts- und richtungsabhängigem Polymerisationsgrad bzw. Einlagerung
- Intermediäre, fraktal profilierte Mittlerschichten zum stofflichen Verbund und zur Beherrschung tribologischer Effekte.
- Dialektik zwischen Kontur und Textur - unter aktuellen Lastfällen nachträglich einstellbar
- Funktionserfüllung und Schutz des „Bauteils“ durch Tensigrität
- Modulare Strukturierung mit Multifunktionalität
- Dynamisch Stabilisierung im Fließgleichgewicht zwischen Stoffanbau und –abbau
- Materialintrinsische, geschachtelte und vermaschte Regelwerke
- Additive Stoffanlagerung zur Formoptimierung und Selbstverstärkung
- Technomorphe Modelle von Biosubstraten in der Kontinuumsmechanik
- Fluidische Komponenten unter Binnendruck und Faserarmierungen als interne Aktorik
- Oberflächenfunktionalisierung und systemische Biokompatibilität in allen Größenordungen

II.1.3.3.7 Ergebnisse der strategischen Arbeit mit den BIOKON-Partnern
(unter Leitung von Herrn Braun; dem LTA Mannheim (Dr. Bappert) und dem ZUK der DBU)

Neben der Option, von den verschiedenen Partnern Exponate zusammenzutragen, die wahrscheinlich in Aussage und Gestaltung sehr unterschiedlich sein werden, ist es sinnvoller, gemeinsam neue Objekte zu gestalten, die einem in dieser Art noch nicht präsentiertem Rahmenthema, welches die Kompetenzen aller Ausstellungspartner einschließt. Damit sei mehr Parität in den Zuleistungen aller Interessenten und von vornherein ein gemeinsames Design gewährleistet.

Es wurde vorgeschlagen, als ein solches Rahmenthema die „Biogenen Materialien als Werkstoffe“ auszuwählen. Es schlägt die Brücke zwischen der Biotechnologie und der Bionik, die damit als „Zwei Seiten einer Medaille“ popularisiert werden könnten. Es soll damit verdeutlicht werden, dass unter „Bionik“ nicht die Nutzung der unter technischer Umwandlung von Lebewesen erzeugten Substrate selbst, sondern der technischen Nachvollzug des nach deren Untersuchung gewonnenen Verständnisses der Aufbau-Prinzipien zu verstehen ist.

Dieses dialektische Wechselverhältnis zwischen einem seit langem wohletablierten und sich in revolutionärer Entwicklung befindenden Faches (siehe *Molekulare Technologien*!) und einer wissensübertragenden Methode, die damit meist fälschlich gleichgesetzt wird, gilt es darzustellen: Biotechnologie nutzt den aus der lebenden Natur gewonnenen Stoff, Bionik dagegen nur das Funktionsprinzip. Dass sich beide jedoch gegenseitig ergänzen, also komplementäre Teile einer modernen Technik sein müssen, kann damit dem Publikum und insbesondere Entscheidungsträgern in Gesellschaft und Wirtschaft veranschaulicht werden.

Dieses Basisthema bietet eine logisch begründete Klammer zwischen den an einer solchen, also in ihrer Bedeutung nicht zu unterschätzenden Ausstellung:
Im BIOKON waren mehrere Partner aktiv, die mit Erfolg „werkstoff“-bedingte Effekte in die Technik umsetzen, seien es die Oberflächeneffekte (siehe Lotos, Haihaut), der Nachvollzug der Binnenstruktur („Insektenpanzer“ und „Pflanzenstängel“) oder die Me-

chanismen der Formanpassung, in denen die lebende Natur jeglichem technischen Gebilde weit überlegen ist.

Biologische „Werkstoffe“ haben grundsätzliche Eigenschaften, die bisher nur ansatzweise umgesetzt wurden – sie sind hierarchisch aus immer kleineren funktionellen Untereinheiten aufgebaut (z.B. zellulär) und werden in einem ständigen Austausch der chemischen Bestandteile repariert und umgeformt.

Eine Gesamtausstellung „Werkstoffe der Natur – Substanz und Prinzip“ böte auch vom Ausstellungs-technischen und Didaktischen Aspekt einige Vorteile:

- Objektvielfalt (wenn die museale Leitlinie „*Historik* der Werkstoff-Gewinnung, -Verarbeitung, -Nutzung“ miteinbezogen wird. Holz, Leder, Seide u.v.m.),
- Haptische und interaktive Komponenten („Anfassen und Begreifen“, einfache Versuche zu deren physikalische und auch chemische Eigenschaften),
- Vernetzbarkeit von Leitthemen: wie *Komplexität in Struktur und Funktion*, *Kontur* (äußere Geometrie) *und Textur* (innerer Feinbau), und „*Von Makro über Mikro zu Nano*“.

Ein technisches Material wiederum, das in Wechselwirkung mit einer lebenden Umgebung gebracht wird, kann mit den Kriterien „Biokompatibilität“ als Implantat, „Biofunktionalisierung“ in der Zell-Biotechnologie oder der „Recyclisierbarkeit“ in der Umwelt nach biologischen Substratprinzipien gestaltet worden sein.
Die Besucher einer solchen Exposition werden damit an das Verständnis herangeführt, dass das „Vorbild Natur“ uns dann Fortschritte in der Industrie sichern wird, wenn nach seriöser und aufwändiger Forschung auf die Funktionsprinzipien, die wesentlich im „Geheimnis“ ihrer besonderen „Werkstoffe“ liegen, zurückgegriffen werden kann.

II.1.3.4 Industrielle Umsetzung (A4)

Seit dem 09.02.2001 besteht ein Rahmen-Kooperationsvertrag der TU Ilmenau mit der BMW AG. In diesem Rahmen betreute das Fachgebiet Biomechatronik, TU Ilmenau einen Fachpraktikanten und zwei Diplomanden zu dem Thema "Optimierung von Fahrwerks- und Antriebskomponenten sowie deren Fertigung - Bionische Lösungsansätze".

Seit Juni 2006 bestehen enge Kooperationen mit der Firma Tetra Ilmenau (Dr. Mollenhauer) zum Zwecke der Umsetzung von Sensor-Bionik in der Robotik und Automatisierungstechnik und dem Projekt "NanoKap" (Land Thüringen) für die Anwendung zellbionischer An-sätze in der Mikrofluidik in Feinstkapillar-Glassystemen.

Für die Entwicklung eines bionisch inspirierten technischen Sensors, der real-time Richtung und Geschwindigkeit wahrnimmt, bestehen enge Kontakte zu FSE micro drones GmbH im GV, Dr. Michael Groß.

Im Projektzeitraum wurde die Zusammenarbeit mit dem Textilforschungsinstitut in Greiz zur Abstimmung und Präzisierung von Arbeitsschritten im Thema Textilbionik-Sensorisierte Gewebe und patentamtliche Anerkennung einer Gebrauchsmuster-Schutzschrift für ein druckgetriebene Peristaltik-Rohrleitung nach dem Prinzip des Herzmuskel-Faserverlaufs fortgeführt. Der Gebrauchsmusterschutz „Peristaltische Pumpe“ ist unter der Nr. 20 2006 015 721.2 eingetragen.

Im Rahmen einer Arbeitsbesprechung im Textilinstitut Chemnitz wurden im Rahmen von Kooperationsüberlegungen Möglichkeiten der Modulintegration (Fluidikleitungen, Signalaufnehmer ect.) diskutiert. Ein fortgesetzter Austausch mit diesem Partner wird sich auf die Mustererstellung aktorisierter technischer Gewebe konzentrieren.

Am 21.11.2006 wurden die verschiedenen Aktivitäten des Fachgebietes Biomechatronik im Rahmen einer Diskussionsrunde mit Technologiemanagern von Thüringen Innovativ vorgestellt. Thüringen Innovativ hat eine Beraterfunktion für das Thüringer Wirtschaftsministerium inne. Dabei wurden auch BIOKON-relevanten Forschungsthemen präsen-

tiert. Ziel dieser Veranstaltung war eine Bahnung zukünftiger Kooperationen mit Thüringer Industriefirmen.

Für die Fachgruppenarbeit „Industrielle Umsetzung“ wurden von Ilmenau drei Fragebögen zur Erfassung des Status Quo bionischer Produkte innerhalb des Netzwerkes bearbeitet. Dafür erfolgte eine Kontaktaufnahme mit den Industriepartnern, die bei der Produktentwicklung und -vermarktung beteiligt waren (4H-Jena-Engineering, Fa. Bechtel & Höfer Hanau).

Unsere inhaltliche Zuarbeit zur Aufgabe der FG „Industrielle Umsetzung“ bestand in der nachvollziehenden Darstellung der am Standortes Ilmenau erstellten patentierten Erfindungen, die auf bionischer Anregung basierend bis zur industriellen Umsetzung geführt wurden, wie das Selbstreinigungsmodul eines Mikrosensors für das Umwelt-Monitoring oder einer Mikroförderpumpe für hochviskose Medien.
Anhand des Entwicklungsablaufes des unter der Pat.-Nr. 19724240. 5-15 geführten Mikropumpe wurden unter Einbeziehung der Miterfinder und Lizenznehmer der Fa. Höfer & Bechtel, Mainhausen unsere Erfahrungen seitens Weges von der bionischen Implikation im Entwurfsprozess bis zur Markteinführung exemplarisch beschrieben.

Mikropumpen werden überall dort benötigt, wo Flüssigkeiten in besonders genauer Dosierung gefördert und eingespritzt werden sollen, wie z.B. in der Analytischen und Synthese-Chemie, der Pharmatechnologie und Medizintechnik, bei integrierten Schmierungssystemen oder aber in Druckverfahren, wo es „auf den Punkt genau“ (d.h. nano-Liter!) ankommt. In Kombination mit anderen Fluid-Komponenten (Mischer-Module, Strömungsteiler, Sensoren u.ä.) werden sie Bestandteile des „*lab-on-chip*“-Prinzips, welches zunehmend Märkte mit Massenbedarf erschließt.

Die lebende Natur hat das Problem mit dem gerichteten Verdrängen eines Mediums vielfach gelöst – so z.B. in der *Peristaltik* des Verdauungstraktes. Sie ist die Abfolge einer Verformungswelle, bei der sich zuerst der Rohrquerschnitt durch eine Einschnürung verringert und danach, phasenverschoben dazu, der in Förderrichtung liegende Rohrabschnitt verkürzt wird. Obwohl sich ein Druck in alle Richtungen aufbaut, wird jeweils an

der Einschnürungsstelle eine Differenz der Fließwiderstände erreicht, die das Zurückfließen behindert. In der nachgiebigen Darmwand bewirken das die kontraktilen Muskelfasern, die entweder in Längsrichtung orientiert sind oder den Umfang des Rohres umfassen.

Die bionische Modellmethode erfordert neben dem Verständnis dieser komplexen Verformung als Ablauf von Einzelbewegungen die Simulation in einem Computermodell, um den Wirkungsgrad des Volumentransports bei variablem Kontraktionsweg unter gegebenen Viskositäten abzuschätzen. Für die *Mikrotechnologie* mit ihren bekannten Möglichkeiten und Grenzen muss das dreidimensional wirksame natürliche Pendant auf einen planaren Aufbau transformiert werden. Der Antrieb kann nicht durch Kontraktionen in den zwei Achsen („längs und quer") erfolgen, sondern muss durch eine einzige Verformungswelle einer flachen Membran realisiert werden. Das Werkstoffspektrum gestattet nur eine Verbindung von bestimmten hochelastischen Polymerfolien mit den gebondeten Silizium-Schichten des Grundkörpers und der Montageaufwand muss gering gehalten werden. Unmittelbare Umsetzung findet das System als Dispenser für Silberleitkleber.

Eine Zielstellung der *Biomechatronik* ist die Weiterentwicklung eines peristaltischen Systems mit integrierten Kontraktionsantrieben in einer räumlichen, schlauchartigen Ausführung als ein implantierbares, *biokompatibles* Medikamenten-Dosiersystem, welches von Gavrilova et. al. durch das Gebrauchsmuster „Peristaltische Pumpe" (Nr. 20 2006 015 721.2) realisiert wurde.

Der Verkaufsumsatz liegt bisher bei € 20.000,00 pro Jahr (seit 2000) und ist vorwiegend auf die Lieferung von intelligenter Steuerungstechnik für die Pumpe zurückzuführen. Eine der letzten Steuerungen ging an Forscher in Australien, die sie mit einer eigengefertigten Peripherik versehen.

Wirtschaftlich relevant sind die mit der Pumpe verbundene Folgeinnovationen. Die Firma Höfer & Bechtel hat mit dem miniaturisierbaren und einfachen Peristaltikaufbau eine Lösung gefunden, die für viele mikrofluidische Aufgaben in der Labortechnik geeignet ist.

Es können Einwegchips mit integrierten Einwegpumpen realisiert werden. Musterpumpen in Stückzahlen kleiner 10 entstehen mittels Fräsen und Erodieren praktisch in Manufaktur. Die Einwegpumpen ab Stückzahl 200 werden mit Spritzguß-Verfahren gefertigt.

Im Februar erfolgte eine Abstimmung zwischen den Fachgebieten Biomechatronik, Getriebetechnik (TU Ilmenau), der Firma Otto Bock HealthCare GmbH und Orthopädische Klinik für die Universität Regensburg zur adaptiven Körperstützsystem zur Heilung der Rückenkrankheiten. Aus diesem Treffen wurde einen Projektskizze zum „Ideenwettbewerb Bionik“ zusammengefasst.

II.1.4 Ergebnisse der thematischen Facharbeit

II.1.4.1 Biomechatronik, Biomedizintechnik, Mikrosystemtechnik, Aktuatorik, Robotik (B5)

In den ersten beiden Fachgruppentreffen wurden die Schwerpunkte der Fachgruppenarbeit definiert und Kooperationsmöglichkeiten der Teilnehmer identifiziert. Vom Standort Ilmenau wurde ein Vorschlag unterbreitet, über eine „Kompetenzbündelung“ im Bereich der Robotikforschung nachzudenken. Diese könnte in Form eines EU-weiten Netzwerkes realisiert werden.

Am 28.09.2005 fand im Rahmen der AMAM-Konferenz das 3. Fachgruppentreffen „Biomechatronik, Robotik, Sensorik“ zusammen mit den BIOKON-Gruppen TU Ilmenau, BIOKON e.V. Berlin, RWTH Aachen, TU Berlin, Uni Bielefeld, ITV Denkendorf, IFF Magdeburg und anderen AMAM-Teilnehmern statt. Abschließend gab es eine Diskussionsrunde mit dem Titel: “Bionics meets robotics - assessment of demands”, in deren Rahmen Themen wie Nachgiebigkeit und Adaptivität von Sensoren, Tastsysteme für Roboter nach dem Vorbild der Insekten, Ausstattung eines Flugobjektes mit Sensoren zur Richtungs- und Geschwindigkeitsdetektion und bionisch inspirierte Mechanosensoren diskutiert wurden.

Ausgeprägt produktbezogene Anwendungsorientierung kennzeichneten die mehrfachen Treffen mit Geschäftsführern und Mitarbeitern von KMUs mit explizit bionischer Ausrichtung wie: Dipl.-Biol G. Rummel (Fa. Bionic Solutions Saarbrücken GbR (Anlagenbau)), Dr. M. Groß (Geschäftsführer der Fa. Flying Security Equipments Gmbh i.G. Göttingen (Flugeräte)), Dipl.-Ing. A. Jordan (Fa. PinguTec – Innovationsberatung) und Dipl.-Ing. H. Plettenberg (FZMB Bad Langensalza – Mikrofluid-Systeme).

Das 4. Fachgruppentreffen B5 („Biomechatronik“) wurde am 07.10.2005 während der Klausurtagung in Seeheim zusammen mit der Fachgruppe B6 („Sensorik“) abgehalten. Als Einstieg in die Diskussion stellte die Arbeitsgruppe der TU Ilmenau zuerst eine Zusammenfassung der BioKoN - Aktivitäten im Rahmen der AMAM vor. Des Weiteren kam der Vorschlag zur Erstellung einer Tabelle zur Erfassung von Sensoren in Natur und Technik, wo die Schwerpunkten auf dem Stand der technischen Sensoren, eine Bedarfsermittlung von technischen Sensoren, laufenden Projekte zur Sensorbionik und eine Klassifizierung biologischer Sensoren lagen.

Im Juni fand das 5. Fachgruppentreffen „Biomechatronik, Robotik, Sensorik“ zusammen mit den BIOKON-Gruppen TU Ilmenau, TU Berlin, IFF Magdeburg, TU Darmstadt, TETRA Ilmenau und FSE micro drones GmbH statt. Jeder Teilnehmer hat die Aktivitäten der eigenen Arbeitsgruppe als Vortrag präsentiert. Eine aktive Diskussion mit konstruktiven Fragen und Vorschlägen wurde unmittelbar nach jedem Vortrag durchgeführt. Zum Schluss wurde eine Liste von Vorschlägen zur Zusammenarbeit verfasst, wobei die Schwerpunkte vorwiegend im Bereich Sensorik und Aktorik lagen. Im Rahmen der Fachgruppentreffen im Halbjahr 2006 konnten die Arbeitsschwerpunkte der einzelnen BIOKON-Standorte identifiziert werden. Auf dieser Basis wurden gemeinsame Interessen und zukunftsweisende Themen definiert und diskutiert. Als Mittelpunkt der Fachgruppenarbeit sollen in Zukunft folgende Themen bearbeitet werden:

- Nachgiebige Mechanismen in der Robotik und Sensorik
- Sensorik und Aktorik für die Robotik
- Gesteuerte Steifigkeit („controlled compliance“)

Ein nächstes Fachgruppentreffen wird wieder in Form eines Workshops abgehalten werden, in dem diese Themen im Bezug auf die konkreten Projekte der beteiligten BIOKON Partner diskutiert werden.
Im Rahmen des Bionik Kongresses „Patente aus der Natur“ in Bremen fand das 6. Fachgruppentreffen „Robotik, Biomedizintechnik und Bionik der Mikrosysteme“ zusammen mit der Fachgruppe B6 „Sensorik“ statt. Aufgrund der thematischen Nähe dieser beiden Fachgruppen, bieten sich gemeinsame Diskussionen an. Hauptthema der Diskussion waren Möglichkeiten der Fortführung der Fachgruppenarbeit nach der Förderphase BIOKON II.

Ein entscheidendes Ergebnis, das in der Diskussion innerhalb der Fachgruppe entstand, ist das Konzept der „Steuerbaren Nachgiebigkeit für adaptive Mechanismen der Robotik“. Bei der Fragestellung hinsichtlich der Funktion von Antrieben ergab sich die neue Sichtweise, dass motorische Komponenten nicht nur zur unmittelbaren Bewegungserzeugung durch Auskopplung einer Kraft oder eines Momentes auf die Umgebung eingesetzt werden sollen, sondern auch als über den gesamten Körper des Roboters verteilte, in dessen Bauwerkstoff eingebettete Aktoren zur belastungs- und bewegungsaufgabenabhängigen Einstellung der Materialsteifigkeit dienen können. Analog dem Skelettmuskel haben sie zu einem großen Teil aktuell unerwünschte Verformungen zu verhindern und Bewegungen elastisch zu bedämpfen. Dieses Konzept bezieht bionische Themenstellungen der Werkstoffwissenschaften, der Regelungstechnik/Sensorik und der Biomechanik mit ein.

Adaptivität und Dynamisierung mechanischer Strukturen sind nicht nur ein Prinzip der lebenden Natur, sondern enthalten immanent ein Potenzial der Umweltkompatibilität, welches über die „starre herkömmliche Technik“ hinausführt. Technikentwicklung unter frühzeitigem und umfassenden Einbezug des Aspektes der Ressourcenschonung als auch der Sicherstellung der Handlungsfähigkeit des Menschen bedarf also unter anderem auch eines Paradigmenwechsels bei mechanischen Konstruktionen. Aktuelle Entwicklungen autonomer Bearbeitungsmaschinen, insbesondere in der zunehmend dominierenden Robotertechnik kommen durchaus diesem Kriterium entgegen.

Nachgiebigkeiten in mechanischen Strukturen stellen in vielen Bereichen der Technik eine unerwünschte Eigenschaft dar, deren Auswirkungen durch besondere konstruktive oder regelungstechnische Maßnahmen beseitigt bzw. kompensiert werden müssen. Die *Präzision* von Bewegungen wird traditionell durch eine Versteifung mittels Überdimensionierung des Materialeinsatzes der Bauteile und durch fertigungsaufwendig enge Toleranzen realisiert. Demgegenüber steht das Konzept der gesteuerten Nachgiebigkeit (*Controlled Compliance*): Durch die reversible Änderung von

- Zustandsbedingungen, die eine aktuelle Steifigkeit eines Werkstoffes in seiner Binnenstruktur (z. B. Erweichung durch thermischen Einfluss oder einer elektrischen Feldgröße) oder durch
- Formwechsel des Bauteils (geometriebedingte Stabilität, Querschnitts- und Wandspannungsänderung durch Binnendruck-Erhöhung) mittels fluidischer (hydraulischer oder pneumatischer) Energiezufuhr

können biologische energiesparende Bewegungsprinzipien der Lokomotion und Manipulation für die Technik erschlossen werden.

Das mechatronische Konzept eines Roboters höherer Funktionalität als Zielkriterium der Entwicklung adaptiver Mechanismen enthält nicht nur die

- Verlagerung mechanischer Funktionen in die Software in relativ autarken Bussystemen in den mechanischen Komponenten und die
- Sicherung von Bewegungspräzision und –stabilität durch Messung und aktive Rückführung, die Ausregelung nicht messbarer bzw. nicht antizipierbarer Störgrößen aus der Umgebung, sondern auch einen
- nachgiebigen Gesamt-Aufbau, der sowohl eine Leichtbauweise, als auch die Manipulation weicher und sensibler Objekte variabler Geometrie ermöglichen soll.

Die Einsatzfelder wären neben der Handhabung elastischer (biegeschlaffer oder allseitig deformabler, engl.: „*compliant*“) Bauteile, wie z. B. Kabelbäumen in der Kfz-Montage,

insbesondere die Positionierung fein- und mikrotechnischer Strukturen und der Einsatz beim Handling biologischen /chirurgischen Materials.

Im Gegensatz zur mathematischen Behandlung von Festkörperstrukturen existieren für viele *nachgiebige* Strukturen noch keine geschlossenen Modelle zur mathematischen Beschreibung der Eigenschaften, Bewegungsformen, Deformationen, Lebensdauer sowie zur Synthese mechanischer Systeme mit elastischen Elementen.

In der Folge technischer und technologischer Entwicklungen gewinnen bionische Ansätze zur Lösung komplexer Problemstellungen auch in der angewandten Mechanik zunehmend an Bedeutung. Lebewesen entwickeln sind grundsätzlich als mechanisches Kontinuum. Ihre mechanische Funktion ist neben der geometrischen Struktur und Gradienten mechanischer Parameter durch exogene Zustands-Bedingungen determiniert und ermöglicht die Vielfalt der evolutiv optimierten Konstruktionen der Natur.

Die nachgiebigen Mechanismen erlauben die Realisierung komplexer Bewegungsvorgänge und lösen klassische Mechanismen in einigen Bereichen mit erweiterten Funktionsanforderungen z.T. gänzlich ab. Dazu gehören Anwendungen in der Medizintechnik, deren Anforderungen einerseits einen hohen Freiheitsgrad (*stereotaktische* Sonden) als auch nichtverletzende (*atraumatische*) Konturen und die Vermeidung von Hinterschneidungsflächen (Sterilisierbarkeit) andererseits einschließen.

Der Kenntnisstand der Biomechanik ist unter bionischen Gesichtspunkten zu erschließen, da durch die anwendungsorientierte Analyse und Modellierung der evolutiv optimierten Strukturen in ihrer Übertragung auf technische Problemstellungen erfahrungsgemäß neue Anregungen als auch Anwendungsgebiete ergeben können. Die physikalische Modellierung des Muskels und der Bindegewebe-Typen trägt wiederum zum Verständnis solcher Konstruktionen bei, deren Kraftpfade durch unmittelbar einstellbare (*Visco*-)-Elastizitäten bzw. spezifischer Faserzugrichtungen bestimmt und ihre Bewegungen durch gerichtete Verformung bewirkt werden. Als funktionstragende Kriterien der Nachgiebigkeit der organismischen Konstruktionen können identifiziert werden:

- Speicherung mechanischer Energie, Sicherung und Fremdkrafttoleranz sowie Minimierung des Regelaufwandes, Bildung funktioneller kinematischer Ketten,
- Brechung von Kraftspitzen, Spannungsvergleichmäßigung, Lenkung von Kraftflüssen und weiche Kraftauskopplung
- Phasenabgleich bei zyklischen Bewegungsvorgängen im Wechsel kinetischer und potentieller Energie

Die Funktionserfüllung durch die Form eines Bauteils wird durch die intrinsische Textur des Schichtmaterials abgelöst und damit besser mit nicht-mechanischen Größen im Bewegungssystem verknüpfbar. Hierbei gewinnt die innere Struktur (als räumliche Anordnung und Ausrichtung der Teilchen wie Makromoleküle oder Mikrokristallite) von Werkstoffen eine immer größere Bedeutung.

Die in schneller Entwicklung befindlichen *smart-materials* weisen die Fähigkeit zur reversiblen Wandlung einer nicht-mechanischen Energieform in Arbeit auf und sind somit für Aktoren und darin implementierte Mechanosensoren geeignet. Diese erfolgt unter dem Einfluß einer exogenen Energiegröße durch eine räumliche Umlagerung stofflicher Entitäten (*Nanostrukturen*), wie der Atome oder Ionen in Kristallgittern oder makromolekularer Netzwerke. Das bewirkt die Erzeugung einer Kraft bei Änderung ihrer mechanischen Spannung. Aktoren sind - in Abgrenzung zu den ausschließlich bewegungserzeugenden Motoren - die Koppelglieder zwischen den nichtmechanischen Prozessen insbesondere der Informationsverarbeitung mit jeglichen Zuständen eines technischen Systems, die sich unter der Einwirkung einer intern generierten Kraft ändern.

Das Prinzip der reversiblen Beeinflussung mechanischer Eigenschaften durch den Einfluss eines äußeren Faktors wird durch die Aktorik belegt, bei der Bewegungen durch Zufuhr elektrischer, magnetischer oder thermischer Energie generiert werden. Im Falle der Implementierung eines aktorischen Substrates in ein mechanisches Rahmensystem werden Steifigkeitsänderungen bewirkt und das Gesamtsystem in einen varaiblen Spannungszustand versetzt. Die Antriebskomponenten erfahren dabei einen Funktionswandel zu Stellelementen.

Der Beitrag der Vorlaufforschung im Bereich der Werkstoffwissenschaften besteht neben der Entwicklung von Materialalternativen in der Erprobung geeigneter Technologien der Abformung, der Weiterbearbeitung und des Einprägens mechanischer Eigenschaften auch nach der Formgebung der *nachgiebigen* Strukturen.

Einen weiteren Beitrag zur Grundlagenforschung wird die Suche nach Analogien auf dem sich massiv entwickelnden Gebiet der Biomaterialien und der Funktionsprinzipien bei organismischer Mechanismen im Makro- und Mikrobereich liefern. Ergebnisse der in den letzten Jahren großzügig geförderten Biomaterialforschung („*biomimetic materials*“) zeigen, dass grundsätzlich alle Gerüstsubstanzen in Lebewesen (neben Knochen bes. Chitin-Skelette mit den als nachgiebige Zonen gestalteten stoffschlüssigen Gelenken ohne „Sollbruchstellen“) eine Orts-, Richtungs- und Zeitabhängigkeit in ihren Kennwerten aufweisen. Daher sind Biomaterialien als „*Gradientenwerkstoffe*“ mit ihrer ausgeprägten Komplexität im mechanischen Verhalten unter den Zielkriterien der Entwicklung als Vorbild-Systeme anzusehen. Ihre Wachstumsprozesse bieten Beispiele zu Synthese, montagefreier Formgebung und Einprägung mechanischer Funktionalität.

In erster Linie steht dabei der Gewinn an Erkenntniszuwachs, der sich ergibt, wenn ein weitgehend unerschlossenes Gebiet, wie es die alternative Mechanik nachgiebiger Strukturen mit vielseitig beeinflussbarem Verhalten bietet, von Arbeitsgruppen sich ergänzender Fachgebiete aufeinander abgestimmt bearbeitet wird.

II.1.4.2 Sensorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation (B6)

Ausgehend von der Teilnahme an einem Arbeitstreffen der Fachgruppe B6 seitens des Standorts Ilmenau wurde eine gemeinsame fachübergreifende Anschauungsweise des bionischen Potentials der Sinnesphysiologie formuliert. Sie beantwortet die Frage, in welchem Grade die biologischen Sinnesorgane und Rezeptoren für die Entwicklung von Mess- und Sensortechnik Anregungen bieten können.

Daraus wurde das Konzept des Reizleitungsapparates als ein wesentliches biologisches Vorbild für Mess- und Sensorsystem in der Technik erarbeitet und den auf diesem Ge-

biert explizit arbeitenden Partnern unter der Zielsetzung komplementärer Arbeitsrichtungen in den Interessenschwerpunkten zur Diskussion gestellt. Unser Grundansatz geht davon aus, dass technische Systeme der Informationsaufnahme ähnlich der biologischen Sinnesorgane komplexe Begleitstrukturen aufweisen, die in dem Falle als signalvorverarbeitende Sensorperipherie bezeichnet wird. Während die eigentliche Signal-Erregungswandlung in Lebewesen generell auf Änderungen biochemisch bedingter Membranladungen beruht, steht der Technik das viel weitere Lösungsfeld halbleiterphysikalischer Effekte zu Verfügung. Daher sollte sich unsere gemeinsame Suche nach Applikationen auch auf die Leistungen des Umfeldes der eigentlichen Sinneszellen konzentrieren.

Für die Interaktion von Organismen mit ihrer Umgebung haben sich im Laufe der Evolution eine Vielzahl verschiedener Sinnessysteme entwickelt. Alle diese Sinnesorgane haben die Art der Signalverarbeitung gemeinsam: die spezifische Reizenergie wird generell in ein elektrochemisches Membranpotential, das frequenzcodierte Aktionspotential, umgewandelt. Demzufolge liegt die höchste Variabilität biologischer Sensoren in den nicht-nervösen Begleitstrukturen, die somit auch eine große Inspirationsquelle für technische Umsetzungen darstellen. Aus diesem Grund konzentrieren wir uns auf den Reiz-Leitungs-Apparat, der alle Strukturen einschließt, die an der Transmission und Aufbereitung der signal-tragenden Energie zu den potentialgenerierenden Rezeptorzellen beteiligt sind. Obwohl eine Vielzahl verschiedener Strukturen in diesen Prozess involviert sind, können sechs diskrete Funktionen identifiziert werden, die für die Ankopplung an die Umwelt bzw. den Schutz des eigentlichen biologischer Sensors essentiell zu sein scheinen. Nach einer Darstellung dieser Teilprozesse und einiger weiterer Sensorstrategien wird in einem Promotionsvorhaben am Beispiel des Tasthaar-Sensor-Systems von Säugetieren der Weg vom biologischen „Vorbild“ zur technischen Umsetzung in eine interaktive Sensorperipherie bearbeitet.

Die dabei identifizierten Kriterien zoologischer Rezeptoren sind hinsichtlich folgender Charakteristika biologischer Sensoren unter nach technischen Gesichtspunkten interessant:

- Größe/ Gewicht - Die Größe der funktionellen Einheiten biologischer Sensoren liegt im Bereich von Mikro- und Nano-Dimensionen.
- Sensitivität - Sinnessysteme in der Natur zeichnen sich durch ihre außerordentliche Sensitivität aus, so antworten z.B. Photorezeptoren auf einen einzigen Lichtquant.
- Redundanz - Durch ihre spezifische Anordnung in Form hunderter paralleler Rezeptorzellen weisen natürliche Sensoren ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis auf. Außerdem wird dadurch die Fehlerwahrscheinlichkeit minimiert.
- Robustheit - Biologische Sensoren zeigen sich aufgrund von mechanisch aktiven Sensorperipherien, störungstoleranter Umweltankopplung bzw. die Möglichkeit zur permanenten Re-Kalibrierung sehr robust gegenüber mechanischen Einflüssen der Umgebung.
- Dynamisierung - Durch eine Sensor-Aktor-Integration in unterschiedlichen Hierarchiestufen (Enkapsis) wurden im Laufe der Evolution dynamische Sensoren entwickelt.
- Wahrnehmung verschiedener Reizqualitäten erfolgt durch Multimodale Sensor-Systeme

Aus unserer Sicht hervorzuheben war ein weitgehender Konsens mit den Partnern bes. aus der Robotik bei den Begriffsabstimmungen technischer Sensor-Kriterien, unabhängig von ihrer spezifischen Messaufgabe bzw. des Detektionsprinzips, wie auch in der Vorgehensweise und Zielrichtung weiterer Kooperationen zwischen Biologen und Ingenieuren:

- Gemeinsames Herausarbeiten der Spezifik biologischer Sensoren unter technischen Umsetzungs- und Anwendungsaspekten
- Strategien der Sensor-Aktor-Integration in unterschiedlichen Hierarchiestufen und Komplexität für die Entwicklung dynamischer Sensoren (wie Zustellbewegungen zur Aperturerweiterung, interne Akkomodation, Adaptation und *off-set*-Einstellung, Sakkadische Aktion zur Kontrastverstärkung)
- Möglichkeiten der Verbesserung der Robustheit technischer Sensoren, mechanisch nachgiebiger Sensorperipherien und störungstoleranter Umweltankopplung

- Bioanaloge Sensor-Anwendungen in nicht-visueller Sensorik und Mehrkanal-Integration zur Umgebungskognition autonomer Roboter für Lokomotion und Manipulation
- interindividuelle Kommunikation zur abgestimmten Interaktion robotischer Verbände

Mit der TU Ilmenau brachten wir Kompetenzen in der Entwicklung und Mustererstellung von Mikrosensoren ein:

- *On-chip*-Lösungen für Sensoren zur Messung physikalische Parameter (Kraft- in µN-Auflösung, Thermo-, optoelektronische, akustische Sensoren sowie zur Detektion von Strömung, Turbulenz, Viskositäten und Vibration)
  (siehe Leistungsdarstellung in der FG Homepage „Mikromechanische Systeme“ der TU Ilmenau
- mikrofluidische Prozessankopplungen für chemische Sensoren (Leitfähigkeit in Flüssigkeiten, *p*H-ChemFET´s u.ä.)
- Integration von Stellaktoren in Sensoren bzw. von Sensoren in Mikromechanismen (z. B. kraftgeregelte Mikromanipulatorik)
- Erfahrungen bei bionischen Entwürfen (aktiv selbstreinigende Sensoren) bzw. biointegrative Strukturen (Mikrokavitäten) zum Handling von Zellen und Zellkomponenten (z. B. „Forisom“-Projekt, Biohybridsysteme, siehe BIOKON-Homepage)
- Konzepte zu mikrosensortechnischen Applikationen im Bio-Monitoring (z. B. Umweltmesstechnik, analytische Biomechanik der tierischen Lokomotion)
- Promotionsthemen laufen zu Messung, Modellierung sowie medizintechnischer Applikationen otoakustischer und haptischer Signalkänale am Menschen und der taktilen aktiven Sensillensystemen bei Säugetieren (A. Müller, St. Lutherdt, K. Carl, I. Gavrilova)

Das Thema Sensorbionik wurde ebenfalls in Form eines Vortrages bei einem Deutsch-Chinesischen-Symposium 2005 in Ilmenau vorgestellt. Derzeit wird aufbauend auf dieser Vorstellung ein Kooperationsprogramm mit chinesischen Kollegen erarbeitet.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Analyse von Silikon-Grafit-Faser-Dehnungssensoren und der "Erschließung ihres vielfältigen konstruktiven Anwendungspotentials mit bionischer Inspiration (z.B. Muskelspindeln bzw. Hauttaktilität)" . Dieses Thema wird in Zusammenarbeit mit dem TITV Greiz bearbeitet.

II.1.5 Einwerben weiterer Gelder für Bionik-Projekte

II.1.5.1 Projekt „InspiRat“

Das FG Biomechatronik, TU Ilmenau ist seit dem 01.10.2006 an dem Verbundprojekt „Inspirat“ maßgeblich beteiligt. Das Projekt wird vom BMBF über drei Jahre mit einem Gesamtvolumen von 3,45 M€ gefördert. Ziel ist es, einen Kletterroboter nach dem Vorbild kletternder vierbeiniger Wirbeltiere. Mit diesem soll die externe Inspektion von Leitungsbündeln in den für Menschen unzugänglichen Einsatzbereichen ermöglicht werden.

Erster Schwerpunkt des Projektes ist ein grundlegendes Verständnis des quadrupeden Kletterns. Hierfür lassen sich vierbeinige Vorbilder für die Kletterrobotik in drei Gruppen aufteilen:

- Krallenkletterer (Ratte, Katze)
- Greifkletterer (Primaten, Chamäleon)
- Haftkletterer (Klippschliefer, Geckos)

Aufbauend auf umfangreichen Vorkenntnissen zur Fortbewegung dieser Tiere auf flachem Grund haben wir Hypothesen über deren Mechanik des Kletterns entwickelt, deren quantitative Überprüfung der Eckdaten für die Auslegung analoger Maschinen liefern wird.

Die in Betracht gezogenen Tiere sind in der Ausführung ihrer Bewegungen multifunktional – sie können laufen <u>und</u> klettern. An ihnen können wir evolutiv entstandene kinematische Ketten studieren. Säugetiere zeigen eine Konstruktion aus nur leicht modifizierten („modularen“) Grundelementen und sind ganz offensichtlich zur Bewältigung der Anforderungen einer Vielzahl von Substraten und Bewegungen befähigt. Im diesem Zusam-

menhang spielen die Haftmechanismen bzw. Mechanismen zur Erhöhung der Haftreibung eine Rolle.
Der zweite Schwerpunkt ist die bionische Umsetzung der Ergebnisse in einen biologisch inspirierten Kletterroboter. Technisches Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung eines kleinen bis mittelgroßen Kletterroboters nach dem Vorbild kletternder vierbeiniger Wirbeltiere. Die Maschine soll folgenden Anforderungen genügen:

- Kletterfähigkeit auf Substraten mit variablen Durchmessern (Leitungen, Masten, Seilen)
- Autonome Bewegungsfähigkeit (möglichst eigene Energieversorgung, lokale, regionale und zentrale Intelligenz)
- Kabellose Steuerbarkeit und Datenaustausch (zentrale Intelligenz)
- Nutzlasttragfähigkeit zur Aufnahme von Sensoren (z.B. Kamera und Beleuchtung; Thermosensoren, Chemo-Sensoren etc.), welche Informationen aus der zumeist technischen Umwelt aufnehmen und drahtlos weiterleite
- Zugfähigkeit für das Nachziehen von leichten Hilfsseilen
- Spätere Erweiterungsfähigkeit als Plattform für manipulative Fähigkeiten

Mit dem Projekt „InspiRat“ soll der Nachweis der Einsetzbarkeit eines Kletterroboters nach dem Vorbild eines kleinen Wirbeltiers erbracht werden.
Die Projektpartner sind in den entscheidenden Abschnitten der Entwicklungskette jeweils international ausgewiesen, sie haben alle in wechselnden bi- und trilateralen Konstellationen bereits erfolgreich Projekte durchgeführt. Die Projektpartner der FSU Jena und der TU Ilmenau haben in den letzten 15 Jahren gemeinsam wesentlich zur Entschlüsselung der Prinzipien vierbeiniger Fortbewegung beigetragen, die Kooperation Zoologie - Biomechatronik ist etabliert.
Die Fa. TETRA GmbH ist eine Technologiefirma in Ilmenau, mit der die Antragsteller Gorb, Fischer und Witte jeweils bereits in verschiedenen Projekten erfolgreich zusammengearbeitet haben.
Der Antragsteller Gorb am BIOKON -Standort MPI Stuttgart hat artübergreifend eine Vielzahl von Mikrohaft- und –greifmechanismen aufklären können. Seit einigen Jahren besteht eine Vielzahl an Forschungskontakten zu dem FG Biomechatronik, der Zoologie

in Jena und der Firma Tetra GmbH, unterstützt durch die gemeinsame Mitgliedschaft im BIOKON e.V..

II.1.5.2 Projekt „EasycaTEX“

Seit 01.10.2006 wird in Fachgebiet Biomechatronik in Kooperation mit Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V. Greiz das Projekt „Grundlegende material- und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Integration kognitiver Eigenschaften in textile Flächen mit bionischen Lösungsansätzen“ durchgeführt. Ziel des hier vorgestellten Projektes ist es, ein textiles flexibles Sensorarray mit eingebetteten dehnungssensitiven Silikonfasern/Faden-Kombinationen und vorgegebener Steifigkeit der Trägerstruktur im Hinblick auf eine Verwendung in Medizin oder Robotik zu realisieren. Für den Musterbau werden die Prinzipien der menschlichen Haut angewandt. Das erste Model, welches in diesem Projekt entstanden ist, wurde auf der Hannovermesse 2007 auf dem gemeinsamen BIOKON-Stand präsentiert.

II.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

(siehe Verwendungsnachweis und Liste der im Rahmen des Vorhabens angeschafften Gegenstände mit Vorschlag zur weiteren Verwendung (rechnerischer Teil))

II.3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aus Sicht der Mitarbeiter des Standorts Ilmenau hat sich die Struktur des Netzwerkes insbesondere durch die Hannovermesse und den Industriekongress Bionik vertieft, so dass die Funktion des Projektverbundes weiter optimiert werden konnte. Besonders die Kooperation mit den KMU, die in zunehmenden Maße mit unserem Standort Kontakt aufnehmen bzw. Beratung suchen, könnte noch wirksamer werden, in dem der Austausch der Kompetenzträger untereinander weiter effektiviert wird.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

II.4.1 Aufbereitung der Rechercheergebnisse

Der Biokon-Standort Ilmenau konnte in erfolgreicher Fortführung der Aktivitäten des ersten Förderzeitraumes seine Vermittlungstätigkeiten zu den drei thematischen Schwerpunkten „Bionik für die Mikrosystemtechnik“, „Bionik für das Biomedical Engineering“, „Bionisch inspirierte Robotik“ weiter ausbauen. Der Internetauftritt des BIOKON (e.V.) wurde hinsichtlich dieser Schwerpunkte deutlich erweitert.

II.4.2 Bionik und Biomechatronik als integrative Lehrfächer

Das systematische Konstruieren als erprobte schrittweise Vorgehensweise, die eine gedankliche Vorwegnahme der Funktion und ihre Umsetzung in ein Produkt beschreibt, gehört zu den Grundmethoden eines Ingenieurs. Der dabei für ein technisches Problem erschlossene Lösungsbereich wird mit der bionischen Methode durch analoge Wirkprinzipien aus der lebenden Natur erweitert. Ein spezifisches Anwendungsfeld der bionischen Denkweise findet sich in der Biomechatronik, einem Fach, dessen Zielsetzung innerhalb der angewandten Biomechanik den Entwurf medizintechnischen Instrumentariums wie adaptiver Implantat-Systeme und patientenunterstützender Robotik mit den Kriterien einer generellen Biokompatibilität einschließt. Dabei wird von der Überlegung ausgegangen, dass die „Biomimesis“, das Ablehnen an die Strukturen und Funktionen des als Einsatzort vorgesehenen Biosystems (insbesondere des menschlichen Organismus) deren Entwurf unterstützt. Die Gestaltung solcher technischer Systeme als Integrat aus mechanischen, elektronischen und informationsverarbeitenden Komponenten mit intrinsischer Anpassungsfähigkeit, realisiert mit den Möglichkeiten der Mikrotechnologie, stellt eine Herausforderung für zukünftige Ingenieure dar.

Die Problemstellung

Seitens des Bundesforschungsministeriums wurde festgestellt, dass „die breite Anwendung von Ideen aus der Bionik ...in der Vergangenheit an einem starren Disziplindenken in den Wissenschaften und am Fehlen eines effektiven Technologietransfers zwischen Forschung und industrieller Anwendung (scheiterte)“. Die Bionik soll in der Ingenieurausbildung als komplementäre Methode zur Erweiterung des Lösungsraumes im techni-

schen Entwurfsprozess vermittelt werden – sie besteht in der systematischen Einbeziehung biologischen Wissens unter dessen anwendungsorientierter Aufbereitung. Die Entwicklung von Ideen aus der Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren setzt den uneingeschränkten Zugang zu Fakten und Daten aus dem jeweils anderen Fachgebiet voraus. Die wesentliche Kommunikations-Barriere ist nach wie vor die unterschiedliche Fachsprache und Darstellungsweise der Forschungsergebnisse. Der Großteil marktwirksam gewordener Produkte beruht auf fachübergreifendem Detailwissen beidseitig gebildeter Erfinder. Jedoch ist ein Universalwissen, welches nötig wäre, um das riesige Potential naturgegebener Lösungen abzuschöpfen, personell kaum verfügbar.

Die Methode

Der heuristische Weg der Ableitung einer *Entwurfsidee* aus Funktionsprinzipien lebender Systeme ist auf vollständige Aufklärung der Kausalzusammenhänge innerhalb des komplexen Struktur-Funktions-Beziehungsgefüges angewiesen. Diese Aufgabe bedarf der systematischen Vorgehensweise mit Schritten der Analogiebildung zwischen biologischer Funktion und technischem Zweck, der Identifikation, Auswahl und Parametrisierung funktionsnotwendiger Merkmale sowie der auf technischer Symbolik basierenden Modellbildung. Das Ergebnis dieser ersten Übertragungsphase, ein Erklärungsmodell, gibt die Gewähr, dass kein essentieller Faktor außer Acht gelassen wurde. Nach Bestätigung der Funktionsvoraussage und dem Abklären dimensionsbedingter Ähnlichkeiten (*Similiaritäten)* erfolgt der Aufbau von Konstruktionsmodellen, die eine Umsetzbarkeit unter Maßgabe technologiebedingter Grenzen belegen, bevor die bionische Lösung in die Schrittfolge des Entwurfsalgorithmus einfließen kann. Die Übernahme biologischer Prinzipien erfolgt über eine technisch basierte Interpretation schon analysierter organismischer Systeme, die zu Modellen führt, die die objektiven Unterschiede zwischen der biologischen Evolution und der Entstehung von Technik berücksichtigen.

Besonders in der ersten Phase, bei der Suche nach analogen Lösungen einer technischen Problemstellung in der lebenden Natur, ist ein gewisses Maß an biologischen Kenntnissen Voraussetzung – man sollte wissen, *wo* man zu suchen hat. Es geht um die Ökonomie der Wissensvermittlung aus einem den Technikwissenschaften ferneren

Fachgebiet. Zwangsläufig müssen biologische Bildungsinhalte einer Stoffkomprimierung unterliegen. Für das Auswahlproblem – „Was weglassen?“ – gibt es keine verbindlichen Kriterien; sie wird durch den fachspezifischen Bedarf bestimmt. Das bedeutet für die Didaktik im Technikstudium eine pragmatische Spezifizierung biologischer Lehrinhalte als Hintergrundwissen aus biologischen Bereichen von der Molekularbiologie bis zur überorganismischen Ökologie. Dabei unterscheidet sich der Untersuchungsgegenstand: Hier die zu vorbestimmten Zwecken geschaffene, montierte Maschine - dort der auf Selbsterhaltung angelegte Organismus, entstanden in einem Entwicklungsprozess.

Der bionische Handlungsprozess

Anfragen aus der Industrie veranlassten uns, Wissen und Methoden der Bionik systematisch aufzuarbeiten. In Kooperation sowohl mit weiteren Inhabern bionisch fundierter Patente als auch Konstruktionsmethodikern der Technikwissenschaften arbeiten wir an einer praxisnahen Synthese beider Vorgehensweisen. Einige Algorithmen zur Übertragung biologischer Wirkprinzipien in die Technik finden sich in der einschlägigen Bionik-Literatur mit unterschiedlichem Verallgemeinerungsgrad und spezifischem Geltungsbereich.

Gelungene bionische Umsetzungen vermeiden die „1:1-Kopie“ ihres Vorbildes, indem sie das physikalische *Wirkprinzip* über eine abstrahierende Modellbildung mit technischen Begriffen aufklären. Zuvor bedarf es jedoch der Suche nach sinnvollen Analogien – eben dem biologischen „Vorbild“. Dazu wird die unübersehbare Vielfalt der Phänomene in organismischen Systemen mit potentieller technischer Relevanz in eine pragmatisch begründete Ordnung gebracht. Das systematische Konstruieren ist eine erprobte schrittweise Vorgehensweise, die - durch empirisch begründete Regeln wie auch durch eine heuristische Theorie unterlegt - eine gedankliche Vorwegnahme der Funktion und ihre Umsetzung in eine substantielle Struktur beschreibt. Anderseits ist eine Systematisierung der Lebewesen zu Objektklassen in der Biologie eine der Grundvoraussetzungen der Beherrschung evolutiv entstandener Mannigfaltigkeit. Biologische Taxonomie und Konstruktionsmethodik, die sich von ihrem jeweiligen Ansatz her (hier das Ordnen vorgefundener Komplexität, da ein zielgerichtetes Schaffen komplexer Systeme) diametral gegenüber stehen, sollen effektiv verknüpft werden. Es wurde mit einem Analogiesuche-Programm ein Tool vorgestellt, das die Position der Analogiefindungsphase zur

Einbeziehung biologischer Wirkprinzipien in den technischen Entwurfsablauf kennzeichnet und unterstützt. Die Bionik vermittelt zwischen den Handlungssträngen beider Wissenschaftsgebiete („Brückenfunktion“ der Bionik zwischen technischem Entwurfsablauf und biologischer Analyse).

Der Weg bionischer Umsetzung lässt sich hinreichend formalisieren, indem die grundsätzlichen Gemeinsamkeiten, bei Anwendung der Grundfunktionen der Konstruktionslehre, auch bei den Lebensvorgängen in einer Gegenüberstellung bestimmt werden. Dazu ist jedoch ein hohes Maß an Abstraktion nötig, da mehr noch als die Komponenten eines technischen Systems die Körperteile von Lebewesen multifunktionell und von sich dynamisch verändernder Struktur sind. Um aus der Fülle biologischer Strukturen erfolgversprechende Lösungsmöglichkeiten zu gewinnen, werden diese systematisch geordnet dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt. Das Auffinden von unter Maßgabe lebensspezifischer Rahmenbedingungen entstandenen „Vorbildlösungen“ im derzeit verfügbaren biologischen Wissen bleibt durch das „Analogie-Suche-Programm“ (auf der von der DBU initiierten Bionik-Konferenz in Marienthal 2006 zur Diskussion gestellt) weniger der sporadischen Assoziation überlassen.

II.4.3 Erstellung und Bereitstellung des Analogiesuchers

Das systematische Konstruieren als erprobte schrittweise Vorgehensweise, die eine gedankliche Vorwegnahme der Funktion und ihre Umsetzung in ein Produkt beschreibt, gehört zu den Grundmethoden eines Ingenieurs. Der dabei für ein technisches Problem erschlossene Lösungsbereich wird mit der bionischen Methode durch analoge Wirkprinzipien aus der lebenden Natur erweitert. Um diese Vielfalt der Phänomene mit technischer Relevanz in eine umsetzungsorientierte Ordnung zu bringen, sollen dem auf interdisziplinäre Kommunikation angewiesenen Konstrukteur mit einem Datenbanksystem das dazu verfügbare biologische Wissen so aufbereitet werden, so dass ihm damit zielführende Anregungen gegeben werden. Das mit speziellen Such- und Verknüpfungsmodi untersetzte System soll dem Nutzer unter einer anwenderfreundlichen Oberfläche die für seine fachliche Aufgabenstellung benötigten Informationen zu den verschiedenen biologischen „Vorbildern“ als auch deren weiteren Funktionen zur Verfügung gestellt

werden bzw. die Recherche nach weiteren Details aus der Originalliteratur und Referenzen erleichtern. In Zusammenarbeit verschiedener Kompetenzträger der Bionik wird diese interaktive Enzyklopädie in kurzer Zeit einen anwendungsreifen Vollständigkeitsgrad erreichen.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Infolge der nachweislichen Effizienz des BIOKON und seiner ständig wachsenden Kooperandengruppe wurden auch in benachbarten europäischen Staaten (Österreich und Frankreich) ähnliche Förderprogramme aufgebaut, die jedoch nicht als Konkurrenz, sondern als potenzielle Partner in einem gesamteuropäischen Verbund anzusehen sind. Ein individuelles Angebot zur Zusammenarbeit liegt von österreichischen Kollegen vor.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

siehe Anhang „Referenzenliste“

Ilmenau, den 12.12.2007

Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte
Fachgebietsleiter Biomechatronik TU Ilmenau

A1 Referenzliste

2004

1. Fischer, M. S. & Witte, H. 2004, "Evolution of vertebrate locomotory systems," in *Walking: biological and technological aspects*, F. Pfeiffer & T. Zielinska, eds., Springer, pp. 51-79.

2. Lutherdt, S., Müller, A., Witte, H., & Kempf, W. Contributions to IT-Biocompatibility. 2.Bionik Kongress. Bionik: Innovationen aus der Natur. 2004. Bremen, Germany. Ref Type: Art Work

3. Schilling, C., Zentner, L., Stubenrauch, M., Frank, T., Kempf, W., Scheibner, W., Feustel, M., Voges, D., Wurmus, H., & Witte, H. Ergebnisse der Vermittlungsarbeit des BIOKON-Standorts TU Ilmenau. 2. Bionik-Kongress. Bionik: Innovationen aus der Natur . 2004.

4. Stubenrauch, M., Frank, T., Schilling, C., Voges, D., Witte, H., & Wurmus, H. Mikrolabortechnische Komponenten in der Biomechatronik, in *2.Workshop "Chemische und biologische Mikrolabortechnik"*.

5. Stubenrauch, M., Frank, T., Schilling, C., & Witte, H. Tight Junctions - MicroLab-Module in der Biomechatronik, in *2. Workshop "Chemische und biologische Mikrolabortechnik"*, Ilmenau.

6. Voges, D., Stubenrauch, M., Schilling, C., & Witte, H. Bio-MEMS – Wie können Einzeller oder Motorproteine in technischen Systemen „überleben". 12. Heiligenstädter Kolloquium. Technische Systeme für Biotechnologie und Umwelt 12, 461-465. 2004. Beckmann, D. and Meister, M.

7. Witte, H., Lutherdt, S., & Schilling, C. Biomechatronics - How Much Biology Does the Engineer Need?, in *IEEE CCA/ISIC/CACSD Conference on Control Applications, International Symposium on Intelligent Control, Computer Aided Control Systems Design*, Taipeh (Taiwan) (Invited Paper).

8. Witte, H., Lutherdt, S., & Schilling, C. Biomechatronik - warum noch ein biotechnisches Fach?, in *Ergänzungsband2, Teil 2*, Schiele & Schön, pp. 966-967.

9. Witte, H., Lutherdt, S., & Schilling, C. Bionik - Kreativität der Natur und die Technik von morgen, in *ORTHOPÄDIE + REHATECHNIK*, Leipzig.

10. Witte, H., Ostendorf, U., Schilling, C., Voges, D., & Stubenrauch, M. Wie kann Biomechatronik die Prävention von Erkrankungen des Bewegungsapparates unterstützen?, in *10. Erfurter Tage*, Monade Konzept & Kommunikation, Leipzig; Germany, pp. 291-304.

11. Witte, H., Fischer, M. S., Schmid, M., Gruber, S., Ludwig, O., Hackert, R., Schilling, N., Voges, D., Hoffmann, H., & Preuschoft, H. 2004, "Human bipedality: techanical

preconditions and morphological adaptations," 243 edn, E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung, pp. 25-33.

12. Witte, H. & Schilling, C. Biomechatronics: How much biology does the engineer need?, in *4th Polish-German Mechatronic Workshop*, Wissenschaftsverlag Ilmenau, pp. 26-31.

13. Witte, H., Hoffmann, H., Hackert, R., Schilling, C., Fischer, M. S., & Preuschoft, H. 2004, Biomimetic Robotics should be based on Functional Morphology, *J.Anat.*, vol. 204, pp. 331-342.

2005

14. Fischer, M. S. & Witte, H. 2005, Kinematisches Modell und Dynamiksimulation vierbeinigen Laufens von Säugetieren, *Autonomes Laufen* pp. 211-223.

15. Ijspeert, A. J., Kimura, H., & Witte, H. AMAM 2005 - research on adaptive motion in animals and machines, in *AMAM 2005*, Verlag ILSE, Ilmenau, Germany, p. III-VII.

16. Schilling, C., Fetter, R., Mämpel, J., Schade, J., Kempf, W., Voges, D., Hill, B., & Witte, H. Towards a Bionic Algorithm, in *3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines*, Technische Universität Ilmenau, ed., Verlag ISLE, Ilmenau, p. A-C.

17. Witte, H., Schilling, C., Müller, A., Carl, K., Gavrilova, I., Fetter, R., Mämpel, J., Voges, D., Hackert, R., & Fischer, M. S. 2005, Bionik - Kreativität der Natur und die Technik von morgen, *Orthopädie-Technik*, vol. 12, no. 0340-5591, pp. 847-852.

2006

18. Andrada, E., Stadelbauer, B., Carl, K., Voges, D., & Witte, H. 2006, How to make better understandable the mechanical behaviour of the human trunk during locomotion, *Chinese Journal of Pathophysiology*, vol. 22, no. 13, p. 133.

19. Frank, T., Kempf, W., Müller, R., Stubenrauch, M., Schilling, C., & Witte, H. Ein Beispiel für Gradientenreaktoren nach bionischen Prinzip für chemische Umsetzungen im Mikromaßstab, in *3. Workshop "Chemische und biologische Mikrolabortechnik"*, Ilmenau.

20. Gavrilova, I., Feustel, M., Rothstock, S., Scheibner, W., Schilling, C., Silveira, L. C., & Witte, H. 2006, "Mechanisch adaptible sensorisierte Textilstrukturen,".

21. Gavrilova, I., Feustel, M., Scheibner, W., Schilling, C., & Witte, H. 2006, Sensorisierte Textilien als mechatronisches System, in *Mechatronische Systeme - Entwurf, Anwendungen und Perspektiven* , Universität Nis, Serbien, pp. 33-36.

22. Kimura, H., Tsuchiya, K., Ishiguro, A., & Witte, H. 2006, *Adaptive Motion of Animals and Machines*, 1 edn, Springer Verlag.

23. Schilling, C., Kempf, W., & Witte, H. 2006, Ein Internet-Basiertes Lehr- und Informationssystem für Bionische Aspekte in der Mechatronik, in *Mechatronische Systeme - Entwurf, Anwendungen und Perspektiven*, Universität Nis, Serbien, pp. 45-46.

24. Schilling, C., Fetter, R., Mämpel, J., Kempf, W., Hill, B., & Witte, H. Construction Including Bionical Algorithm. 2006.

25. Witte, H. 2006, Bionisch inspirierte Robotik, *Ingenieurnachrichten*, vol. 2, no. 2006, p. 6.

26. Witte, H. 2006, "Anwendung der Bionik - Der Mensch im Mittelpunkt," in *Bionik - Lernen von der Natur*, B. Hill, ed., DUDEN PAETEC GmbH Berlin, pp. 78-83.

2007

27. Fischer, M. S. & Witte, H. 2007, Legs evolved only at the end!, *Philos.Transact.A Math.Phys.Eng Sci.*, vol. 365, no. 1850, pp. 185-198.