Arnim von Gleich
Christian Pade
Ulrich Petschow
Eugen Pissarskoi

BIONIK

Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale

A. von Gleich, C. Pade, U. Petschow, E. Pissarskoi

BIONIK

Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale

Unter Mitwirkung von:
S. Affinas, O. Glöckner, A. Häusler, L. Spengler, S. Stührmann, T. Wuest

32 farbige Abbildungen
18 Tabellen

IMPRESSUM

Kontakt:
Prof. Dr. A. von Gleich
Dipl.-Ing. S. Stührmann

Universität Bremen
Fachbereich 4 Produktionstechnik
Fachgebiet 10 Technikgestaltung und Technologie Entwicklung
Postfach 330440, 28334 Bremen
E-mail: gleich@uni-bremen.de, Soenke.Stuehrmann@uni-bremen.de
www.tecdesign.uni-bremen.de

Kooperationspartner:

IÖW
Ansprechpartner:
Dipl.- Volkswirt Ulrich Petschow
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, GmbH (gemeinnützig)
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin
E-mail: ulrich.petschow@ioew.de
www.ioew.de

Endbericht des Forschungsprojektes »Potenziale und Trends der Bionik«

Unter Mitarbeit von: Silke Affinas, Arnim von Gleich, Ole Glöckner, Arno Häusler, Christian Pade, Ulrich Petschow, Eugen Pissarskoi, Laura Spengler, Sönke Stührmann, Thorsten Wuest, Paton Patentzentrum Thüringen GmbH

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Innovations- und Technikanalyse
Förderkennzeichen (FKZ 16I1551)
Projektträger: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Veröfftlichungsdatum: August 2007
Ort der Veröfftlichung: Berlin/Bremen, Deutschland
Auflage: 500 Exemplare
Druckerei und Buchbinderei: ASCO STURM Druck, Bremen
Gestaltung und Buchsatz: Dipl.-Des. Andreas Wolter, Weimar (wolter-gestaltung.de)
Bildredaktion: Dipl.-Des. Andreas Wolter, Dipl.-Ing. Sönke Stührmann
Titelgestaltung: Dipl.-Des. Andreas Wolter unter Verwendung eines Motivs von Marcus Liebich, Bremen (wire-fx.net)

Außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte sind alle Rechte vorbehalten. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Autoren nach bestem Wissen erstellt und mit größtmöglicher Sorgfalt geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht völlig auszuschließen. Daher erfolgen alle Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie der Autoren, des Projektträgers und des Verlages. Sie übernehmen deshalb keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige vorhandene inhaltliche Unrichtigkeiten.

Die geäußerten Auffassungen stimmen nicht unbedingt mit der Meinung des Bundesministerium für Bildung und Forschung überein.

Hinweis: Bei sämtlichen in dieser Broschüre genannten Personenbezeichnungen sind stets sowohl die männlichen als auch die weiblichen gemeint. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden in der Regel jedoch ausschließlich männliche Personenbezeichnungen verwendet.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

ISBN 978-3-932092-86-2

DANKSAGUNG

Die vorliegende Publikation ist der Endbericht des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Vorhabens „Trends und Potenziale der Bionik“ (FKZ 16I1551). Die Veröffentlichung wurde ebenfalls im Rahmen des Vorhabens gefördert. Für die Förderung möchten wir uns beim BMBF bedanken.

Das Forschungsvorhaben wurde vom Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin durch Dr. Marc Bovenschulte betreut. Unser besonderer Dank gilt ihm für die geduldige Begleitung und für die hilfreichen, das Vorhaben befördernden Hinweise. Auch bei den Teilnehmern an den beiden zweitägigen Workshops und bei den zahlreichen Gesprächspartnern, die ihre Zeit und ihr Wissen im Rahmen von z. T. mehrstündigen Interviews zur Verfügung gestellt haben, möchten wir uns für die Kommentierung der von uns vorgelegten Thesen und vor allem für die engagierte und lebhafte Diskussion bedanken. Diese Interviews und Workshops haben ganz wesentlich zu den hier vorliegenden Ergebnissen des Forschungsvorhabens beigetragen.

Schließlich möchten wir uns bei Marlies Timmermann bedanken, die an der erfolgreichen Durchführung der Workshops einen wesentlichen Anteil hatte.

Für die Aussagen der Studie, aber auch für mögliche Fehler und Irrtümer sind allerdings allein die Autoren verantwortlich.

Die Autoren

INHALT

1 Einleitung 10

2 Bioniktrends 13
2.1 Definition Bionik 14
2.2 Drei Hauptentwicklungsstränge der Bionik 19
2.3 Drei Ebenen des »Lernens von der Natur« 25
2.4 Der besondere Charakter der Bionik 28
2.5 Zwischenfazit Bioniktrends 33

3 Technologische Perspektiven des »Lernens von der Natur« 35
3.1 Bionik in Technologieprognosen 37
Nationale Technologieprognosen 39
Supranationale Technologieprognose: EU-Foresight 43
Technologieprognosen von Unternehmen 45
3.2 Ergebnisse der Kurzfallstudien 47
Sensorik 51
Robotik 55
Materialwissenschaften 57
Biokeramik 61
Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) 64
Prothetik 67
Gewebezüchtung 70
Nanobiotechnologien 71
Konvergierende Technologien 73
3.3 Biomimetik und Technomimetik – Chancen und Risiken der Konvergenztechnologien 76
3.4 Zwischenfazit Technologische Perspektiven 82

4 Themen, Akteure und Netzwerke – Ergebnisse der Literatur- und Patentanalysen 85
4.1 Nationale F&E-Landschaft der Bionik 86
4.2 Die Netzwerke »BioKoN« und »Kompetenznetz Biomimetik« 87
4.3 GTBB, Konferenzen und Experteninterviews 96
4.4 Vernetzungsaktivitäten und -intensitäten zwischen den Akteuren 111
4.5 Analyse und Beschreibung der deutschen F&E-Landschaft durch Literaturrecherchen 116
Bionik im engen Sinne 118
Lernen von der Natur 123

4.6 Internationale F&E-Landschaft 127
Patent- und Literaturanalyse jeweils zu »Bionik im engen Sinn« und zu »Lernen von der Natur« 127
Netzwerkanalyse 137
4.7 Bionik in Bildung und Ausbildung 146
Stand der Bionik-Ausbildung 146
Wie soll bionische Ausbildung gestaltet werden? 149
4.8 Zwischenfazit zu Themen, Akteuren und Netzwerken 154

5 Bionik und Innovation 159
5.1 Bionik im deutschen Innovationssystem 160
5.2 Bionische Innovationen 164
5.3 Treiber und Hemmnisse bionischer Innovationen am Beispiel von Optimierungsverfahren und künstlicher Photosynthese 169
5.4 Bionik spezifische Treiber und Hemmnisse 174
5.5 Perspektivische Einordnung der Bionik 178
5.6 Zwischenfazit Bionik und Innovationen 180

6 Zusammenfassung 189
6.1 Bioniktrends 190
6.2 Technologische Potenziale des Lernens von der Natur 193
6.3 Themen, Akteure und Netzwerke – Ergebnisse der Literatur- und Patentanalysen 197
6.4 Bionik und Innovationen 199

7 Literaturverzeichnis 207

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 221

9 Anhang 225

1 EINLEITUNG

»Die Natur braucht sich nicht anzustrengen, bedeutend zu sein. Sie ist es.«

ROBERT WALSER, 1878–1956

1 EINLEITUNG

BIONIK = BIOlogie + TechNIK

Bionik ist ein Kunstwort aus Biologie und Technik. Bionik kann charakterisiert werden als der Versuch, sich bei der Entwicklung technischer Lösungen an der Natur zu orientieren bzw. von der Natur zu lernen. Organismen, Populationen und Ökosysteme übertreffen mit ihren Leistungen in vielen Bereichen alle bisher verfügbaren technischen Lösungsansätze. Die Bionik nimmt sich diese organismischen Leistungen aus dem „Patentbüro der Natur“ zum Vorbild. Die Bionik ist in der Öffentlichkeit und in den Medien sehr positiv besetzt, sie fasziniert. Bionische Lösungen gelten als raffiniert, ökologisch angepasst und risikoarm.

Aufgabe der Studie

Die vorliegende Studie „Potenziale und Trends der Bionik“ hatte die Aufgabe, die wichtigsten Trends und Potenziale der Bionik als wissenschaftlich-technische Entwicklung und als Basis für Innovationen sowie die Stellung der Deutschen Bionikforschung und -entwicklung im internationalen Vergleich auszuloten. Aufbauend auf Fallstudien, Literatur-, Patent- und Netzwerkanalysen, Interviews und Workshops wurden Aussagen erarbeitet zum Status der Bionik als Forschungs- und Entwicklungsbereich, zur Berechtigung des „Bionischen Versprechens“ auf ökologische Angepasstheit und Risikoarmut bionischer Lösungen, zu aktuellen Trends in der Bionik, zu ihren aktuellen und erwartbaren technologischen Potenzialen sowie zu Rahmenbedingungen, Treibern und Hemmnissen bei der Umsetzung dieser Potenziale in Innovationen. Diese Aussagen können als Grundlage dienen für ein integriertes Förderkonzept für die Bionik in Deutschland.

Gegenstand & Vorgehen der Studie

Wie jede Studie musste auch diese sich ihres Gegenstandes versichern und methodische (Vor-)Entscheidungen treffen. Zu den weit reichendsten Entscheidungen für den Ansatz und damit auch für die möglichen Ergebnisse dieser Studie gehörte ohne Zweifel die Abgrenzung des Untersuchungsfeldes. In Absprache mit dem Auftraggeber sollten nicht nur diejenigen Forschungen, Entwicklungen und Akteure betrachtet werden, die sich explizit mit Begriffen wie Bionik bzw. Biomimetik identifizieren (Bionik im engeren Sinne). Erfasst werden sollten auch diejenigen Bereiche, die einen allgemeineren „bionischen Ansatz“ im Sinne eines „Lernens von der Natur“ verfolgen, ohne dabei Bezug auf Begriffe wie Bionik bzw. Biomimetik zu nehmen. Damit wurde das Feld in einem ersten Schrittt einmal um weite Teile der Robotik und der Prothetik aus dem Bereich der Medizintechnik erweitert. Beide orientieren sich vor allem am Vorbild des menschlichen Körpers,

bzw. der Natur des Menschen. In einem weiteren Schritt wurden zusätzlich diejenigen Bereiche in die Betrachtung einbezogen, die sich an fundamentalen Fähigkeiten nicht nur einzelner Organismen, sondern biologischer Systeme, bzw. noch fundamentaler „des Lebendigen“ orientieren. Zu den Fähigkeiten, die das Lebendige auszeichnen, gehören nicht nur die Fähigkeit zur Selbstorganisation (diese finden wir in einfachen Formen auch schon im physikalischen und chemischen Bereich), sondern um die Fähigkeiten zur Selbsterhaltung im Fließgleichgewicht in dynamischen Umgebungen (Homöostase, Adaptivität, Selbstregulation, Selbstheilung). Mit der Orientierung an solchen Fähigkeiten mit dem Präfix „Selbst“ befinden wir uns unmittelbar an der Front (leading edge) einer ganzen Reihe von hoch aktuellen wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen, angefangen von den Materialwissenschaften bis hin zu Hard- und Software in den Informations- und Kommunikationstechnologien.

2 BIONIKTRENDS

2.1 Definition Bionik
2.2 Drei Hauptentwicklungsstränge der Bionik
2.3 Drei Ebenen des „Lernens von der Natur“
2.4 Der besondere Charakter der Bionik
2.5 Zwischenfazit Bioniktrends

*»Wer die Welt nicht von Kind auf gewohnt wäre, müßte über ihr den Verstand verlieren.
Das Wunder eines einzigen Baumes würde genügen, ihn zu vernichten.«*

CHRISTIAN MORGENSTERN, 1871 – 1914

2 BIONIKTRENDS

»Bionik« und »Lernen von der Natur«

Die Bestimmung des Gegenstands dieser Studie ist alles andere als trivial. Wir arbeiten einerseits mit einem engen Bionikverständnis und konzentrieren uns dabei auf diejenigen Forschungen, Entwicklungen und Akteure, die sich explizit auf Begriffe wie Bionik und Biomimetik beziehen. Ergänzt wird diese Sicht durch die Betrachtung eines weiteren Feldes bionischer Forschung und Entwicklung, in dem diese Begriffe nicht oder kaum verwendet werden, in dem aber eine deutlich erkennbare Orientierung am Vorbild Natur vorherrscht sowie der Versuch, zur Lösung von im weitesten Sinne technischen Problemen von der Natur zu lernen. Im nun folgenden Text konzentrieren wir uns zunächst auf den erstgenannten Bereich der Bionik im engeren Sinn. Im darauf folgenden dritten Kapitel, mit Blick auf technologische Potenziale, weitet sich dann der Blick auf den allgmeineren Ansatz eines Lernens von der Natur.

2.1 Definition Bionik

Im Laufe der mittlerweile mehrere Jahrzehnte überdauernden Auseinandersetzung mit dem Begriff „Bionik“ (bzw. englisch „bionics“ oder „biomimetics“) und dem dahinterliegenden Konzept eines „Lernens von der Natur“ wurde eine Vielzahl von Definitionen erarbeitet (vgl. UMSICHT 2005, Oertel/Grunwald 2006). Eine Auswahl ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Zusammenstellung ist chronologisch geordnet, beginnend mit der vielzitierten „ersten“ Definition von J. E. Steele aus dem Jahr 1960.

Geschichte des Begriffs »Bionik«

Die vorgestellten Definitionen vermitteln einen Eindruck von den Schwierigkeiten, die mit dem Versuch einer Konkretisierung der vermeintlich einfachen Formel eines „Lernens von der Natur“ verbunden sind. Problematisch ist dabei zum einen die Frage, welche Form und Qualität das „Lernen“ von einem natürlichen Vorbild hat bzw. haben sollte. Die Spannbreite der Definitionsvorschläge reicht von bloßer Inspiration bis hin zur möglichst exakten Kopie. Zum anderen ist der Gegenstand des Lernens strittig – die Spannbreite reicht hier von Form-Funktionszusammenhängen, über systemische (Organisations-) Zusammenhänge und ontogenetische/phylogenetische Entwicklungsprozesse, bis hin zur Ableitung allgemeiner Prinzipien, die als Leitlinien der Technikentwicklung dienen können.

Tabelle 1 — Definitionen von Bionik in der Literatur (eigene Zusammenstellung)

Nr.	Urheber/Jahr	Definition	Quelle
1	J. E. Steele/ 1958-60	„Sie (‚Bionics', *Anm. d. Aut.*) erforscht Systeme, deren Funktion natürlichen Systemen nachgebildet ist, die natürlichen Systemen in charakteristischen Eigenschaften gleichen oder ihnen analog sind."	Gérardin 1972, S. 11
2	J. E. Steele/ 1958-60	„Wissenschaft von Systemen, die nach der Art oder in der Art oder ähnlich der Art lebender Systeme arbeiten"	Forth/Schewitzer 1976, S. 62
3	L. P. Kraismer/ 1967 [Erstveröffent-lichung 1962]	„Die Bionik ist somit die Wissenschaft, welche biologische Prozesse und Methoden mit dem Ziel untersucht, die sich ergebenden Erkenntnisse bei der Vervollkommnung alter und der Schaffung neuer Maschinen und Systeme anzuwenden. Man kann auch sagen, dass sie die Wissenschaft von Systemen ist, die ähnliche Merkmale wie lebende Organismen aufweisen."	Kraismer 1967, S. 12
4	H. Heynert/1976	„Entsprechend dem gegenwärtigen Entwicklungsstand ist die Bionik als eine angewandte Disziplin der biologischen Wissenschaft mit einer durch ihre Zielsetzung bedingten Tendenz zur Integration zu verstehen, die das systematische Studium von Lebewesen für die Lösung technischer, technologischer und architektonischer Probleme zum Inhalt hat, wobei Strukturen und Prozesse in ihren funktionellen Zusammenhängen in den Systemen der Organismen als Anregungen und Vorlagen, insbesondere jedoch als Modelle zu Konstruktionen und Verfahren in den unterschiedlichen Bereichen der Industrie und des Bauwesens dienen."	Heynert 1976, S. 37

→ Fortsetzung nächste Seite

Nr.	Urheber/Jahr	Definition	Quelle
5	E. Forth & E. Schewitzer/ 1976	„Bionik: wissenschaftliches Integrationsgebiet mit einer durch technische Ziele bestimmten Problemorientierung heterogener wissenschaftlicher Disziplinen. Ihre wissenschaftliche Materie ist charakterisiert durch Erkenntnisse, die am *biologischen Objekt* gewonnen sind, der bisherigen Technik überlegene Prinzipien verkörpern und einer *technischen Verwertung* zugeführt werden können; d. h., sie fasst verschiedene Disziplinen zur Lösung konkreter technischer Aufgaben mit unterschiedlich gelagerten und wechselnden Schwerpunkten zusammen und erschließt neuartige technische Lösungswege.“ [1]	Forth/Schewitzer 1976, S. 58
6	A. I. Berg/k. A. (evtl. 1976 oder früher)	„Die Aufgabe der Bionik ist es, biologische Objekte mit dem Ziel zu erforschen, die gegenwärtigen technischen Systeme zu modernisieren oder neue und vollkommenere zu schaffen und deren Ergebnisse zu nutzen.“	Greguss 1988, S. 5
7	E. W. Zerbst/1987	„Generell ist die Bionik durch drei Definitionsgruppen zu beschreiben: (1) Sie ist eine Wissenschaft zur Planung und Konstruktion von Systemen, deren Funktionen solche der biologischen Systeme nachahmen. (2) Sie ist eine Wissenschaft zur Planung und Konstruktion von Systemen, die charakteristische Eigenschaften biologischer Systeme aufweisen. (3) Sie ist eine Wissenschaft zur Planung und Installation von Organisationsstrukturen, die die Wechselbeziehungen biologischer Organisationsmuster nachahmen.“	Zerbst 1987, S. 27

1 Kursivdruck im Original, Fettdruck hingegen nicht übernommen

Nr.	Urheber/Jahr	Definition	Quelle
8	VDI-TZ/1993 [2]	„Bionik als Wissenschaftsdisziplin befasst sich systematisch mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme.“	VDI 1993, S. 10
9	W. Nachtigall/ 2002	*Die Definition von VDI-TZ/1993 (s. o.) mit folgender Erweiterung:* „Dazu gehören auch Aspekte des Zusammenwirkens belebter und unbelebter Teile und Systeme sowie die wirtschaftlich-technische Anwendung biologischer Organisationskriterien.“	Nachtigall 2002, S. 3
10	T. Rossmann & C. Tropea/2005	„Bionik = von der Natur lernen, um die Technik zu verbessern“	Rossmann/Tropea 2005a, S. VII
11	J. F. V. Vincent *et al.*/2006	”Biomimetics (which we here mean to be synonymous with ‘biomimesis’, ‘biomimicry’, ‘bionics’, ‘biognosis’, ‘biologically inspired design’ and similar words and phrases implying copying or adaptation or derivation from biology) is thus a relatively young study embracing the practical use of mechanisms and functions of biological science in engineering, design, chemistry, electronics, and so on.”	J. F. V. Vincent *et al.* 2006, S. 471
12	Y. Bar-Cohen/ 2006	“*Bionics* as the term for the field of study involving copying, imitating, and learning from biology […]. […] *Biomimetics* […] [t]he term itself is derived from *bios*, meaning life, and *mimesis*, meaning to imitate. This new science represents the study and imitation of nature’s methods, designs, and processes. While some of its basic configurations and designs can be copied, many ideas from nature are best adapted when they serve as inspiration for human-made capabilities.” (Kursivdruck im Original, *Anm. d. Aut.*)	Bar-Cohen 2006, S. 2

2 Das VDI Technologiezentrum veranstaltete 1993 einen Workshop zum Thema Bionik, auf welchem gut ein Dutzend ausgewiesener Fachleute der damaligen deutschen Bionik-Community sich auf eine Definition von Bionik einigten.

Definitionen sind wichtig, damit klar ist, wovon genau die Rede ist. Definitionen haben damit eine doppelte Funktion, sie dienen der Präzisierung aber auch der Abgrenzung, nicht zuletzt einer Abgrenzung zwischen Bionik und Nicht-Bionik. Insofern verwundert es wenig, dass in der Bionik-Community über solche Abgrenzungen kontroverse Debatten geführt werden. Als Konsequenz hieraus ergibt sich, dass eine Definition von Bionik nicht von einzelnen vorgegeben werden, sondern sich nur im Zuge der weiteren Entwicklung dieses Feldes mehr und mehr herauskristallisieren sollte, um schließlich von einer breiten Mehrheit akzeptiert zu werden. Gegenwärtig scheint sich die Bionik noch (möglicherweise aber auch schon wieder) in einer Entwicklungsphase zu befinden, in der verschiedene Definitionen nebeneinander existieren.

Vor diesem Hintergrund muss auch unser eigener Definitionsvorschlag gesehen werden:

Definition des Begriffs »Bionik« im Rahmen dieser Studie

Bionik ist der Versuch, von der Natur zu lernen. Dabei geht es um die Entwicklung von Innovationen auf der Basis der Erforschung natürlicher, evolutionär optimierter biologischer Strukturen, Funktionen, Prozesse und Systeme.

In der Diskussion mit Vertretern der Bionik-Community[3] wurde deutlich, dass auch diese Definition nicht in angemessener Form die Aufgabe der Präzisierung und der Abgrenzung zu leisten vermag. Elementar für jede Definition der Bionik ist aber u. E. die Zusammenführung der drei Elemente, die für die gegenwärtige Ausprägung der Bionik wesentlich sind: 1) neue (technische) Möglichkeiten für 2) die Lösung gesellschaftlicher Probleme bzw. die Befriedigung von Bedarfen und 3) das „Lernen von der belebten Natur“ bzw. präziser: das Lernen von der im weitesten Sinne „biologischen Forschung“.

Elemente der Definition

Zentral ist somit die Verknüpfung von (neuen) (technischen) Möglichkeiten mit gesellschaftlichen Problemen bzw. Bedarfen. Eine solche Verknüpfung von Möglichkeiten einerseits und Zielen andererseits ist sowohl konstitutiv für die Definition von Technik (als Verknüpfung von Mitteln und Zwecken) als auch für die Definition von Innovation (als erfolgreiche Neuerung zur Befriedigung von Bedarfen). Es geht um Technik und Innovationen. Bionik spezifisch ist v. a. die Quelle, in der nach neuen (technischen) Möglichkeiten bzw. nach Lösungen gesucht wird. Diese Quelle liegt immer weniger in der „direkten“ Beobachtung der Natur, als Quelle dienen zunehmend die biologischen Wissenschaften, die sich mit Phänomenen der

3 Siehe hierzu die Anhänge zu Workshop-Teilnehmern (Tabelle 17) und Interview-Partnern (Tabelle 18).

belebten Natur, also mit der Erforschung natürlicher, evolutionär optimierter biologischer Strukturen, Funktionen, Prozesse und Systeme beschäftigen.

Die Probleme mit einer exakten Definition der Bionik sind zum Teil der gegenwärtigen, hohen Entwicklungsdynamik in diesem Feld geschuldet, aber auch der voranschreitenden Erweiterung der Bionik um Felder, in denen vergleichbare, jedoch nicht als Bionik etikettierte Ansätze verfolgt werden sowie der zunehmenden Erweiterung der Bionik um angrenzende Technologiefelder, allen voran die Nanotechnologien.

Die Definition vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungsdynamik

Die vorgeschlagene Definition dient nur als Ausgangspunkt für die im Folgenden vorgenommene weitere Be- und Umschreibung von Bionik. Dabei soll mithilfe der nachfolgend skizzierten „drei Entwicklungsstränge der Bionik“ sowie der „drei Ebenen des Lernens von der Natur“ eine Annäherung an ein schlüssiges und vor allem handhabbares Bionik-Verständnis versucht werden. Im Zusammenhang mit den sich anschließenden Ausführungen zum Verhältnis von Bionik und Nachhaltigkeit („Bionisches Versprechen“) wird ein sowohl umfassendes als auch einigermaßen konsistentes Bionik-Bild erschlossen. In diesem Zusammenhang wird sich auch zeigen, dass die Arbeit an einem gemeinsamen Leitbild der bionischen Forschung in naher Zukunft sehr viel wichtiger werden wird, als die Arbeit an einer abgrenzenden Definition.

2.2 Drei Hauptentwicklungsstränge der Bionik

Drei Hauptentwicklungsstränge der Bionik

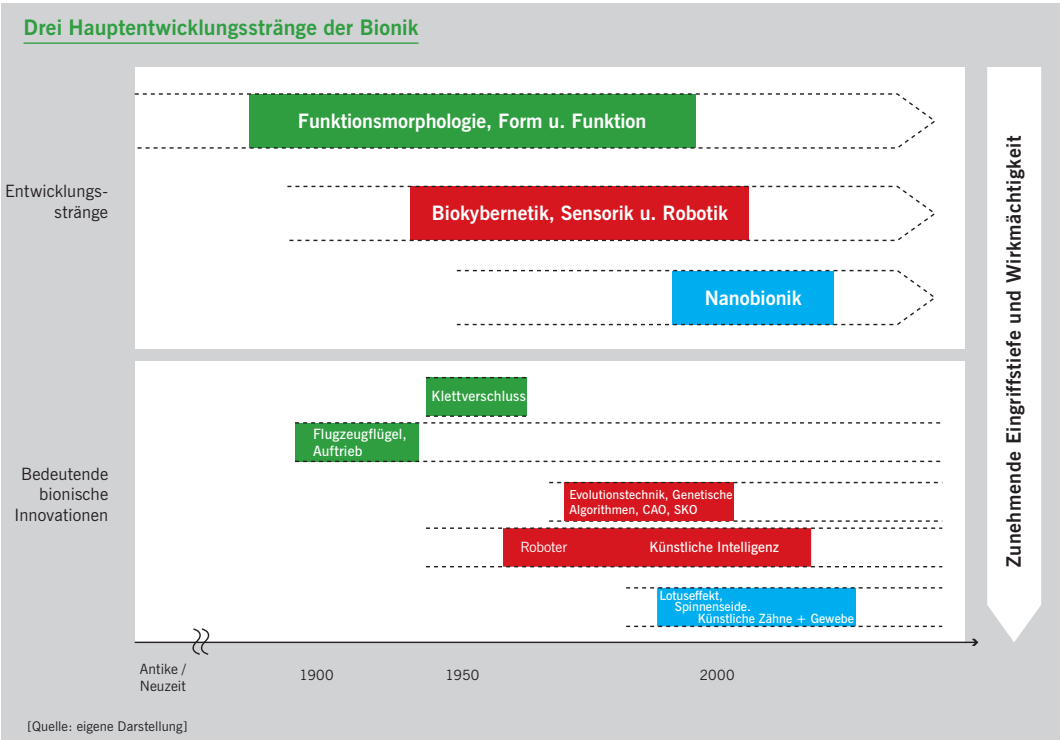
Stark vereinfachend lässt sich die bisherige Entwicklung der Bionik in drei nacheinander einsetzenden Entwicklungssträngen darstellen, wobei mit dem jeweils folgenden Strang wesentliche Restriktionen der vorhergehenden Stränge überwunden werden konnten bzw. können.

Funktionsmorphologie – Form und Funktion

Erster und ältester Hauptentwicklungsstrang: bspw. Flugzeugflügel, Fallschirm, Klettverschluss

Der erste und älteste Entwicklungsstrang fokussiert auf den Zusammenhang zwischen biologischen Formen bzw. Strukturen und deren Funktion. Die Ursprünge dieses Strangs liegen schon in vorwissenschaftlichen Naturbeobachtungen, welche als Anregungen für technische Lösungen dienten. Zu den bisher größten Innovationserfolgen dieser Linie gehören der Fallschirm, der Auftrieb erzeugende Flugzeugflügel, die Stromlinienform sowie der Klettverschluss.

Solange sich die wissenschaftlichen Naturbeobachtungen im makroskopischen Bereich bewegten, konnten technische Umsetzungen in eben dieser Dimension mit den jeweils verfügbaren Techniken und Ma-



Form-Funktions-Abhängigkeiten

terialien insbesondere dann recht gut gelingen, wenn die interessante Funktion v. a. an die Form und weniger an das Form gebende Material gebunden war. Für die Auftriebsfunktion eines Flugzeugflügels ist vor allem seine Form entscheidend, seine technische Realisierung in einem nicht-biologischen Material ändert daran nichts. Interessant ist, dass viele Erfolgsbeispiele in diesem Form-Funktions-Strang aus dem Bereich der Fluiddynamik stammen. Dies führt uns zu einer zweiten Erfolgsvoraussetzung. Ein Teil der Errungenschaften der Bionik im Bereich der Fluiddynamik ist der Tatsache geschuldet, dass der bionische Ansatz Restriktionen der mathematisch-experimentellen Physik zu kompensieren in der Lage war. Weder die analytischen noch die neueren numerischen Modelle der Strömungsmechanik waren bisher in der Lage, das Verhalten von Strömungen exakt genug zu berechnen bzw. vorherzusagen, um sozusagen am „grünen Tisch“ Optimierungen vornehmen zu können. Letztlich musste bisher immer noch ein empirisch-experimenteller (ausprobierender) Optimierungsprozess im Strömungskanal durchgeführt werden – und bei einem solchen Ausprobieren hat die Evolution tatsächlich einen riesigen Vorsprung.

Fertigungstechnische Umsetzungsprobleme

Je mehr sich allerdings die Forschungen zum Zusammenhang von Struktur und Funktion vom makroskopischen in den mikroskopischen, bis hinein in den Nanobereich verlagerten, desto größer wurden die fertigungstechnischen Umsetzungsprobleme. Sie gehören heute zu den wichtigsten Restriktionen für weit reichende Innovationen in diesem Feld. Hochinteressante Entdeckungen, bspw. aus den Bereichen der Oberflächenstrukturierung und der funktionalisierten Grenzflächen in biologischen Systemen (wie u. a. Haihaut/Ribletfolie, Lotuseffekt und Antifouling) können bisher nicht fertigungstechnisch umgesetzt werden, sodass die Qualität mit der des jeweiligen natürlichen Vorbildes vergleichbar wäre. Bei diesen Beispielen ist aber die technische Umsetzungsqualität für die erwünschte Funktionalität und damit auch für den Innovationserfolg definitiv entscheidend.

Beispiel Lotusblatt

Wenn man sich bspw. die heute auf dem Markt befindlichen technischen Umsetzungen der Oberfläche eines Lotusblatts unter einem Rasterelektronenmikroskop genau ansieht, so stellt man fest, dass diese technisch realisierten Oberflächen noch weit von einer Oberflächenstruktur entfernt sind, die wie die Oberfläche des Lotusblatts wirken könnte. Entscheidende Charakteristika, wie die hierarchische Strukturierung mit Noppen und auf ihnen angesiedelten Wachskristallen, werden noch nicht erreicht.

Veränderung des Produktionsparadigmas

Dieser Befund trifft genauso zu auf die hierarchisch strukturierten biologischen Materialien wie Knochen, Zähne, Perlmutt oder Spinnenseide, die in jüngerer Zeit mehr und mehr in den Fokus bionischen Arbeitens geraten. Für die Herstellung solcher Materialien bzw. die Herstellung von Produkten aus diesen Materialien wird eine grundlegende Veränderung unseres Produktionsparadigmas unvermeidbar sein. Die beiden bisher dominierenden Produktionsparadigmen bestanden zum einen darin, aus einem vorgegebenen Materialblock (bspw. Stein oder Holz) eine Form herauszumeißeln. Im darauf folgenden Paradigma wurde zunächst der Werkstoff (bspw. Metalle oder Beton) homogenisiert und dann in eine Form gegossen oder ihm eine Form aufgeprägt. Hierarchisch strukturierte Materialien sind aber auf diese Weise nicht zu realisieren.

Selbstorganisation

Für die Herstellung von hierarchisch strukturierten Materialien dürften nur Selbstorganisationsprozesse weiter helfen, die sich nicht nur an der biologischen Form, sondern auch am Prozess ihrer Entstehung, also an biologischen Entwicklungs- bzw. Wachstumsprozessen selbst orientieren. Sollte dies gelingen, würden sich auch gleich weitere erstrebenswerte Eigenschaften von „smart materials“ erschließen lassen, bspw. die Fähigkeit zur Selbstheilung und die Fähigkeit zur

Anpassung an unterschiedliche Belastungssituationen. Entsprechende Perspektiven könnten sich mit den „Bottom-up“-Nanotechnologien eröffnen.

Signal- und Informationsverarbeitung, Biokybernetik, Sensorik und Robotik

Zweiter Hauptentwicklungsstrang: bspw. Robotik und Künstliche Intelligenz

Während sich der erste Strang um den Zusammenhang zwischen Form und Funktion dreht, ist für den zweiten Strang der kybernetische Regelkreis charakteristisch. Auf diesem Strang liegen die Namensgebung der Bionik durch Steele Ende der 1950er Jahre ebenso wie die Sensorik und die Robotik. Es geht also um den Strang, der im englischsprachigen Bereich üblicherweise mit „bionics“ bezeichnet wird. Im Unterschied zum ersten, funktionsmorphologischen Strang, mit seiner Entwicklung von der Speziellen Biologie (Zoologie und Botanik) über die Ökologie zur Technischen Biologie und Bionik, repräsentiert dieser zweite Strang schon zu Beginn eine andere, nicht weniger bioniktypische Entwicklungslogik.

Biokybernetik

Die grundlegenden Ansätze und Modelle der Biokybernetik, Sinnes- und Neurophysiologie sowie der Ökosystemtheorie wurden zunächst in biologiefernen technischen Bereichen wie der Elektrotechnik entwickelt (Schwingkreise, Rückkopplungseffekte und Regelkreise sowie Sensoren und Aktoren). Erst mit ihrer Hilfe konnten dann wichtige Fortschritte in der Biologie, v. a. in der Biokybernetik, der Sinnesphysiologie und Neurophysiologie, bis hin zur Hirnforschung erzielt werden, welche dann wiederum positiv auf die (nicht nur bionische) technische Entwicklung in der Sensorik, der Informationsverarbeitung und Robotik zurückwirkten. Letztlich war und ist vor allem in weiten Teilen der Sensorik, der Robotik und der Informationsverarbeitung bis hin zur Künstlichen Intelligenz (KI) der Mensch das bisher unerreichte Vorbild.

Künstliche Intelligenz

In den vergangenen Jahren ist es allerdings nach der anfänglichen Euphorie um die Künstliche Intelligenz bedeutend ruhiger geworden. Wenn man aber aus guten Gründen aktuelle Ansätze wie dezentrale Steuerung, „parallel computing“, selbstorganisierende Software und Neuronale Netze zu den bionischen Lösungen mit natürlichem Vorbild zählt (und auch neue Aktoren, wie die den Muskeln nachempfundenen pneumatischen Aktoren (Fa. Festo) hinzunimmt), so scheint sich in diesem zweiten bionischen Strang derzeit wieder eine Aufbruchsstimmung auszubreiten, weil insbesondere mithilfe der erwähnten bionischen Ansätze einige der inzwischen angesammelten Restriktionen im Bereich der Signal- und Informationsverarbeitung und der Robotik überwunden werden können. Dieser zweite, eher biokybernetische

Strang der Bionik scheint also das Erbe der KI anzutreten und zudem über die Verschmelzung von Robotik, Sensorik und Prothetik Fahrt aufnehmen.

Nanobionik – Molekulare Selbstorganisation und Nanotechnologie

Dritter und jüngster Hauptentwicklungsstrang: bspw. Spinnenseide und Biomineralisation

Der dritte und jüngste Entwicklungsstrang der Bionik ist auf der molekularen und Nanoebene angesiedelt. Auch dieser Strang kann bereits auf eine längere Vorgeschichte zurückblicken. Nicht zuletzt getragen vom Schub in der Nanotechnologie insgesamt, scheint ihm aber erst derzeit der Durchbruch zu gelingen (vgl. bspw. Spinnenseide, Biomineralisation, funktionalisierte Oberflächen, Templat gesteuerten Kristallisation, Neurobionik, Nanobionik usw.).

Hohe Dynamik in Forschung und Entwicklung

Der nanobionische Strang fokussiert auf Prozesse der molekularen Selbstorganisation sowie auf die (ontogenetische) Entwicklung von Molekülen, Zellen und Geweben einschließlich deren Umgestaltung (Reaktion auf Beanspruchung) und (Selbst-)Heilung. Mit dieser dritten, derzeit äußerst dynamischen Linie eröffnen sich vielversprechende Lösungsansätze nicht zuletzt auch für die eben erwähnten (fertigungs-)technischen Restriktionen des ersten Strangs. Prinzipien molekularer Selbstorganisation, wie bspw. die Templat gesteuerten Kristallisation und weitere „Bottom-up"-Nanotechnologien, eröffnen längerfristig (fertigungs-)technische Ansätze für die Herstellung u. a. von Oberflächenstrukturen nach dem Vorbild des Lotusblatts oder der Haihaut. Sie eröffnen Ansätze für die Herstellung hierarchisch strukturierter, anisotroper Werkstoffe nach dem Vorbild von Knochen, Zähnen oder Pflanzenhalmen. In der weiteren Entwicklungsperspektive liegen intelligente („smarte") Materialien, die auf unterschiedliche Belastungen reagieren und sich ggf. auch selbst heilen können. Von diesem eher entwicklungsbiologischen Strang der Bionik (Lernen von den ontogenetischen Entwicklungsprozessen) dürfte derzeit und wird in absehbarer Zeit von allen drei Entwicklungssträngen der Bionik die stärkste Dynamik ausgehen, sowohl mit Blick auf die innerwissenschaftliche Dynamik als auch mit Blick auf technische Umsetzungsmöglichkeiten.

»Bottom-up«-Nanotechnologien

Vielversprechende Perspektiven

Noch lassen die großen Innovationserfolge auf diesem nanobionischen Strang allerdings auf sich warten; noch befindet sich vieles im Stadium der Grundlagenforschung. Doch die Perspektiven sind hoch interessant und vielversprechend, insbesondere mit Blick auf die Entwicklung hierarchisch strukturierter, möglichst auch auf Belastung reagierender, adaptiver und selbstheilender Werkstoffe sowie funktionalisierter Oberflächen. Wobei die Funktionalisierung der Oberflächen von der Widerstands- bzw. Reibungsminderung bis zu deren

Erhöhung, vom Kleben und Haften (chemisch und physikalisch) bis zu Selbstreinigung, von der Biokompatibilität über Antifouling bis zur bioziden Wirkung reichen kann.

»biomimetics«

Ein Phänomen, das auch schon im zweiten, biokybernetischen Strang zu beobachten war, ist in dieser dritten Linie besonders weit verbreitet. Die Forschung und Entwicklung zu molekularen Selbstorganisationsprinzipien (bspw. „self assembling monolayers“ (SAMs), Mizellen, künstliche biologische Membranen, funktionalisierte Oberflächen, Templat gesteuerte Biomineralisation usw.) orientiert sich eindeutig am natürlichen Vorbild. Sie kann insofern zur Bionik gezählt werden, selbst wenn sie dies selbst nicht tut. Während bspw. in der Robotik häufig und vergleichsweise unreflektiert mit Kennzeichnungen wie „bio-inspired“ gearbeitet wird, werden in diesem dritten Strang vergleichbare Vokabeln eher selten verwendet. In einigen Ansätzen wird – wenn überhaupt – auf den Begriff „biomimetisch“ zurückgegriffen. Dies gilt auch und insbesondere für den englischsprachigen Raum, in dem dieser dritte Strang vergleichsweise häufig mit dem Begriff „biomimetics“ (im Unterschied zu „bionics“) belegt wird.

Konvergenz der Entwicklungsstränge

»Wachsen lassen«

Es spricht einiges für eine Tendenz zur Konvergenz der drei wichtigsten bionischen Entwicklungsstränge. Insbesondere scheinen sich der funktionsmorphologische und der nanobionische Entwicklungsstrang miteinander zu verbinden. Denn erst die technischen Möglichkeiten des dritten Strangs öffnen in vielen Fällen einen Zugang zur weitgehenden Realisierung und technischen Umsetzung der Erkenntnisse aus den Mikro- und Nanodimensionen des funktionsmorphologischen Strangs. Dies soll kurz am Beispiel des Lotuseffekts verdeutlicht werden. Zur Realisierung einer nanostrukturierten Oberfläche nach dem Vorbild des Lotusblatts fehlen ja nicht nur die Möglichkeiten zur fertigungstechnischen Realisierung der hierarchischen Struktur dieser Oberfläche, sondern – noch viel weitergehender – bestehen bzw. bestünden erhebliche Probleme bei der Aufrechterhaltung dieser Struktur über die (Gebrauchs-)Zeit. Erst wenn wir dem biologischen Vorbild auch in seiner Fähigkeit zum „Wachsen lassen“ und zur Selbstreparatur näher kommen, werden sich diese Probleme angemessen lösen lassen. Insofern spricht einiges dafür, dass die Bionik-Community das „Wachsen lassen“ komplexer (hierarchischer) Strukturen zum Leitbild einer zukünftigen Bionik weiterentwickelt. Dies gilt aber möglicherweise nicht nur für den funktionsmorphologischen und den nanobionischen Strang der Bionik.

Schließlich dürfte sich auch die Bionik kaum der mittlerweile deutlich wahrnehmbaren Tendenz zu einer weiter gehenden Verschmelzung von bisher getrennt verlaufenden wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungslinien entziehen können. Prominent wird dieses Thema derzeit unter dem Schlagwort der „converging technologies" diskutiert (Roco/Bainbridge 2002, Nordmann 2004). Es spricht vielmehr einiges dafür, dass der Bionik sogar – ebenso wie der Nanotechnologie – im Rahmen dieses Verschmelzungsprozesses eine wesentliche Rolle zukommt. Als wichtigste Konvergenzaspiranten werden nämlich neben der Nanotechnologie auch die IuK-Technologien, die Kognitionswissenschaften, die Robotik und die Bio- und Gentechnik angeführt. In all diesen Bereichen haben auch die in der Bionik bedeutenden Begriffe wie Selbstorganisation, Adaptivität, Selbstheilung und Selbstoptimierung einen hohen Stellenwert.

»converging technologies«

2.3 Drei Ebenen des »Lernens von der Natur«

Schwierigkeit der Klassifizierung

Ähnlich wie bei der Bionik-Definition wurden schon zahlreiche Versuche einer Binnendifferenzierung bzw. Klassifizierung bionischer Felder und Arbeitsbereiche publiziert.[4] Die größten Differenzen kommen bei diesen Versuchen dadurch zustande, dass einerseits nach den Anwendungsfeldern der Bionik klassifiziert wird (also bspw. nach Baubionik und Klimabionik) und andererseits nach technischen Funktionen (also bspw. nach Lokomotionsbionik und Sensorbionik; vgl. bspw. Nachtigall 1998, S. 19ff). Probleme bereitet darüber hinaus der Umstand, dass bionische Ansätze prinzipiell in fast allen Bereichen naturwissenschaftlich-technischer Forschung und Entwicklung möglich und sogar im wirtschaftswissenschaftlichen Bereich denkbar sind, so dass eine wie auch immer geartete Klassifizierung Wissenschafts- und Anwendungsbereiche von extremer Breite „unter einen Hut" bekommen müsste.

Drei Ebenen des Lernens von der Natur

Neben der schon vorgestellten Unterteilung in drei Hauptentwicklungsstränge der Bionik (Funktionsmorphologie, Signal- und Informationsverarbeitung sowie Nanobionik) sollen zur weiteren Strukturierung der Bionik noch drei verschiedene Ebenen des Lernens von der Natur unterschieden werden. Diese drei Ebenen werden gebildet durch das „Lernen von den Ergebnissen der Evolution" auf der ersten Ebene (bspw. Klettverschluss, Flugzeugflügel), das „Lernen vom Prozess der Evolution" auf der zweiten Ebene (bspw. Evolutionstechnik, genetische Algorithmen) und das „Lernen von den (Erfolgs-)Prinzipien der

4 Vgl. u.a. Heynert 1976, Zerbst 1987, VDI 1993, Nachtigall 1998/2002

Evolution“ (bspw. Kreislaufwirtschaft, Adaptivität) auf der dritten und abstraktesten Ebene. Selbstverständlich hat auch ein solcher Typisierungs- bzw. Strukturierungsversuch damit zu kämpfen, dass die Wirklichkeit wesentlich komplexer ist, so dass es diese Stränge bzw. Ebenen nicht in Reinform gibt, weil die praktizierenden Wissenschaftler sich selbstverständlich seit langem auch der Objekte, Modelle, Methoden und Erkenntnisse der jeweils anderen Stränge und Ebenen bedienen, wenn es für ihr jeweiliges Forschungsprogramm als nützlich bzw. vielversprechend erscheint.

Lernen von den Ergebnissen der Evolution

Lernen von den Ergebnissen der Evolution: bspw. Haihaut, Winglets

Die erste Ebene des „Lernens von den Ergebnissen der Evolution“ nimmt in der Bionik bisher den größten Raum ein. Durch die technische Weiterentwicklung der Bild gebenden Verfahren, sowohl in deren räumlicher als auch zeitlicher Auflösung (bspw. Rasterelektronen- bzw. Rasterkraftmikroskop, „slow motion“ usw.), wurde auf dieser Ebene ein großes neues Tor insbesondere auch für die Erfassung von Form-Funktionszusammenhängen aufgestoßen (bspw. Lotuseffekt und Geckofuß bzw. van-der-Waals-Kleben). Zunehmende Erfolge bei der Modellierung der Interaktion von dynamischen Körpern (v. a. ihrer Oberflächen) mit den umgebenden Medien (Aero- und Hydrodynamik sowie Partikeldynamik (bspw. Sandskink)) dürften zudem einen Schub erwarten lassen (bspw. hinsichtlich Verständnis, Wirkung und ggf. Nutzung bzw. gezielte Erzeugung von Mikroturbulenzen). Dieser Zweig der fluiddynamischen Bionik profitierte bisher mit seinem Rückgriff auf die Ergebnisse eines jahrmillionenlangen Optimierungsprozesses der Evolution vom bisherigen Ungenügen der analytischen, mathematisch-experimentellen (mechanistischen) und auch der numerischen Ansätze auf diesem Gebiet. Wenn in Zukunft über numerische Methoden ein tieferes funktionales Verständnis dieser Oberfläche-Medium-Interaktionen erschlossen werden kann, könnte sich auch auf dieser Ebene des Lernens von der Natur, die noch über weite Strecken durch den stark vereinfachten Nachbau bestimmt ist (bspw. Flügel, Wulstbug, Haihaut, Winglets), eine stärker theoriegestützte und damit systematisch erfolgreichere Dynamik entwickeln.

Evolutionäre Erprobtheit

Es sind hauptsächlich die Ergebnisse dieser ersten Lernebene, bei denen mit einer gewissen Berechtigung auf evolutionäre Erprobtheit verwiesen werden kann, wobei natürlich noch sehr viel vom konkreten Übertragungsprozess abhängt, der auf den grundlegenden Erkenntnissen aufbaut. Für die aero- und hydrodynamischen Ansätze hat auch der Rekurs auf eine gewisse Ganzheitlichkeit insofern seine Berechtigung, als man sich mehr oder minder der vollen Komplexität der Interaktionen

zwischen Körper und Medium stellt, und damit das Ausmaß zumindest der praktischen, experimentellen Abstraktionen vergleichsweise gering bleibt. Letzteres ist gerade daher von Bedeutung, weil sich die im wissenschaftlichen Experiment relativ erfolgreich praktisch eliminierten, so genannten „Störfaktoren“ oft als die Quelle unerwarteter Nebenwirkungen in der darauf aufbauenden Technik herausstellen (von Gleich 1989 und von Gleich 1998). Die experimentelle und technische Macht über den Gegenstand ist gerade bei denjenigen bionischen Ansätzen, die in erster Linie auf einem Lernen von den Ergebnissen der Natur basieren, stark limitiert. Es geht bei diesen eher um Einpassung und Anpassung in die natürlichen Gegebenheiten als um Kontrolle über sie.

Lernen vom Evolutionsprozess

Lernen vom Evolutionsprozess: bspw. »soft kill option«, Ameisenalgorithmus, Evolutionsstrategie

Eine vergleichsweise große Bedeutung haben inzwischen diejenigen bionischen Ansätze erlangt, bei denen auf der zweiten Ebene vom Prozess der Evolution gelernt bzw. der Prozess der Evolution (aber auch entsprechende ontogenetische Anpassungsstrategien) simuliert wird. Es geht um bioanaloge Optimierungsverfahren wie bspw. die Evolutionsstrategie (Rechenberg/Schwefel), um evolutionäre Algorithmen, aber auch um Schwarmintelligenz (Ameisenalgorithmus) und die von Mattheck entwickelten Verfahren zur Bauteiloptimierung („computer aided optimisation“ (CAO) und „soft kill option“ (SKO)).

Bedeutung bionischer Optimierungsverfahren

Beim Versuch, die aktuelle Bedeutung dieser Verfahren, ihre Dynamik und ihr zukünftiges Potenzial abzuschätzen, ergibt sich ein nur schwer überschaubares Bild. Das mag insbesondere damit zusammenhängen, dass sowohl die Verfahren selbst als auch die jeweiligen Anwendungssituationen (bzw. die jeweils zu lösenden Optimierungsprobleme) so heterogen sind, dass ein Vergleich sowohl der bioanalogen Verfahren untereinander als auch der Vergleich dieser mit nicht bioanalogen konkurrierenden Ansätzen schlicht nicht möglich erscheint.

Die bekanntesten bioanalogen Verfahren werden augenscheinlich breit angewendet, auch wenn diese Anwendungen teilweise nicht immer gut dokumentiert sind. Eine besonders hohe wissenschaftliche Dynamik und Fruchtbarkeit ist derzeit weder bei den bioanalogen noch bei den konkurrierenden Verfahren zu erkennen. Aufgrund der stetig zunehmenden Komplexität in der Wirtschaft und vor allem auch in der Logistik wäre diesbezüglich eigentlich mehr zu erwarten gewesen. Akteure aus der Logistik erklären diese Situation mit einem derzeit noch zu schwachen Problemdruck (bzw. einer zu schwachen Problemwahrnehmung). Die Unternehmen könnten ihre (Optimierungs-)Probleme derzeit noch mit einfacheren Mitteln lösen und hätten eine gewisse Zurückhaltung mit Blick auf die nötigen Einarbeitungszeiten in komplexere Verfahren.

Lernen von den (Erfolgs-)Prinzipien der Evolution

Lernen von den (Erfolgs-)Prinzipien der Evolution: bspw. solares Wirtschaften

Die dritte Ebene des Lernens von der Natur basiert auf der Abstraktion von – zugegebenermaßen nur bedingt – verallgemeinerbaren Erfolgsprinzipien der Evolution. Diesen Erfolgsprinzipien kommt dabei eine doppelte Funktion zu. Sie können zum einen als Argumente dienen für die Geltung und Reichweite des „Bionischen Versprechens" bezüglich ökologisch besser angepasster und risikoärmerer technischer Lösungen durch die Bionik (siehe nächsten Abschnitt). Und sie können als Leitprinzipien in der Technikgestaltung eingesetzt werden, wenn es darum geht, gezielt ökologisch vorteilhafte, intelligentere, adaptivere, flexiblere, eigensicherere und robustere technische Lösungen zu entwickeln. Zu diesen Erfolgsprinzipien gehören:

- solares Wirtschaften und rohstofflicher Opportunismus (Nutzung des Vorhandenen),
- Modularität, hierarchische Strukturierung und Multifunktionalität,
- Ressourceneffizienz (mit Blick auf limitierende Faktoren) und Kreislaufwirtschaft,
- Resilienz (Adaptivität, Diversität, Redundanz),
- Selbstorganisation und Selbstheilung und
- mehrdimensionale Optimierung.

2.4 Der besondere Charakter der Bionik

Bionik als eine besondere Form von Forschung und Entwicklung

Bei der Bionik handelt es sich um eine in mehrerer Hinsicht besondere Form von Forschung und Entwicklung. Einerseits verbindet die Bionik eine starke Anwendungsorientierung mit den Ingenieurwissenschaften und deren Orientierung auf vor allem technische Lösungen. Wobei die Grundlagen im Unterschied zu den Ingenieurwissenschaften, die sich hauptsächlich auf Physik und Chemie stützen, im Falle der Bionik hauptsächlich aus der Biologie stammen. Die Bionik ist so gesehen angewandte „Technische Biologie" – aber nicht nur das, sondern gleichzeitig auch angewandte Neurobiologie, angewandte Molekularbiologie, angewandte Ökologie bzw. Ökosystemtheorie, angewandte Evolutionsforschung und vieles mehr.

Keine klassische Ingenieurwissenschaft?

Andererseits wird man die Bionik wohl kaum als eine Ingenieurwissenschaft im klassischen Sinne bezeichnen können, da die Bionik zum einen von der Form her eher Gemeinsamkeiten mit der Biotechnologie und der Informatik aufweist und zum anderen die Impulse für bionische Forschung und Entwicklung viel stärker aus den in der Bio-

logie entdeckten Möglichkeiten stammen („technology push") als aus den ingenieurtechnischen Anforderungen („demand pull"). Typisch für die Biotechnologie, Informatik und eben auch Bionik ist dabei die Gleichursprünglichkeit und besonders enge Verwobenheit von technischer und wissenschaftlicher Entwicklung. Verschiedentlich wurde diese Form von Wissenschaften auch schon „Techno-Wissenschaft" („techno-science") genannt (vgl. Nordmann 2004).

»techno-science«

Die Bionik unterscheidet sich allerdings auch von diesen „Techno-Wissenschaften", insbesondere durch ihren emotionalen und normativen Gehalt. Der emotionale Gehalt der Bionik bezieht seine Attraktivität aus der Faszination, die von der (belebten) Natur ausgeht. Der normative Gehalt der Bionik bezieht sein Versprechen auf bessere, ökologischere, angepasstere Lösungen aus dem Hinweis auf die evolutionäre (Jahrmillionen währende) Optimierung und Erprobtheit der biologischen Vorbilder. Beim von uns so genannten „Bionischen Versprechen" geht es also um das Verhältnis der Bionik zu den Themen Risiko, Ökologie und Nachhaltigkeit.

Das »Bionische Versprechen« – Bionik und Nachhaltigkeit

Die Faszination der Bionik

Zunächst kann festgestellt werden, dass die Bionik ganz anders und viel mehr als andere F&E-Bereiche *fasziniert*. Dies machen allein schon die vielen (populär-)wissenschaftlichen Publikationen deutlich mit ihren vielen wunderschönen Bildern (bspw. Blüchel/Malik 2006; Cerman et al. 2005; Kesel 2005; Nachtigall/Blüchel 2003; WWF 1991) sowie eine ganze Reihe von Fernseh- und Radiosendungen über Bionik. Die Bionik fasziniert nicht zuletzt junge Menschen, die auf anderem Wege kaum Zugang zur Technik finden würden.[5] Bionische Themen und Lösungen haben eine enorme und enorm positive Resonanz in der Öffentlichkeit. Über die Gründe für diese Faszination ist wenig bekannt und wird entsprechend viel spekuliert. Mit hoher Wahrscheinlichkeit spielt die weit verbreitete Faszination an der (belebten) Natur eine große Rolle und auch eine damit verbundene Ästhetik und Eleganz vieler ihrer Erscheinungsformen und Wirkungsmechanismen, in denen „alles so wunderbar ineinander greift". Wie zur Bestätigung dieser These arbeiten fast alle (populärwissenschaftlichen) Veröffentlichungen zur Bionik mit einer Fülle besonders schöner und ästhetischer Naturbilder.

---

5 Angesichts einerseits rasant steigender Anforderungen an wissenschaftlich-technische Qualifikationen in den Industrienationen im Zuge der Globalisierung und andererseits einem eher sinkenden, auf jeden Fall nicht im gleichen Maße steigenden Interesse an einer natur- und ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung bei jungen Männern und Frauen, muss eine entsprechende Motivation und Begeisterung nicht zuletzt unter innovationspolitischen Gesichtspunkten als wertvolle (und knappe!) Ressource betrachtet werden.

Die besondere Qualität bionischer Lösungen

Die Bionik hat aber auch einen bedeutenden normativen Gehalt – und dieser bildet gleichsam den Kern des „Bionischen Versprechens". Bionik verspricht nämlich mehr oder minder explizit eine besondere Qualität ihrer Lösungen. Diese besondere Qualität wird oft mit dem Hinweis auf die „evolutionäre Erprobtheit" bzw. einen „sich über Millionen von Jahren hinziehenden evolutionären Optimierungsprozess" begründet. Die besondere Qualität bionischer Lösungen soll sich (neben den ebenfalls schon erwähnten emotionalen, also insbesondere ästhetischen Aspekten) meist in drei Aspekten manifestieren: 1) in einer gewissen Risikoarmut, 2) in einer höheren Chance auf ökologische Eingepasstheit und damit in einem Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit und 3) in einer bisher unerreichten Genialität der jeweiligen Lösung, was meist (aber nicht allein) mit dem Hinweis auf einen zugrunde liegenden mehrdimensionalen Optimierungsprozess begründet wird. Es wird – augenscheinlich zumindest bisher nicht ganz zu Unrecht – vermutet, dass Lösungen, die sich im evolutionären Wettbewerb durchgesetzt haben, auch über die entsprechenden Qualitäten verfügen müssten. Trotz allem muss die tatsächliche Berechtigung bzw. die jeweilige Reichweite der Gültigkeit dieses Versprechens kritisch hinterfragt werden.

Gründe für eine mögliche Berechtigung eines »Bionischen Versprechens«

Zunächst jedoch zu den Gründen für eine mögliche Berechtigung des „Bionischen Versprechens". Diese stehen in einem engen Zusammenhang mit den allgemeinen (Erfolgs-)Prinzipien der Evolution, welche bereits im Zuge der Erläuterungen zur dritten Ebene des Lernens von der Natur kurz angesprochen wurden. Folgende Prinzipien können als Erfolgsfaktoren in der biologischen Evolution und als Leitvorstellungen für eine nachhaltigere Technik formuliert werden:

- *Solares Wirtschaften*
  Die natürlichen Prozesse basieren im Wesentlichen auf der Nutzung der Sonnenenergie.
- *Opportunismus* (Nutzung des Vorhandenen)
  Die biologische Evolution der Organismen basiert auf vergleichsweise wenigen Elementen (Struktur bilden v. a. C, O, H, N, P, Ca, P, S, Si). Die Organismen nutzen vorwiegend diejenigen Stoffe und Energien, die sie unmittelbar vorfinden. Das beschränkt zwar radikal ihre Möglichkeiten, erlaubt ihnen aber andererseits das Einklinken in die großen energetischen und bio-geo-chemischen Ströme bzw. Kreisläufe (letzteres ist ein zentraler Aspekt von Nachhaltigkeit).
- *Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft*
  Dort, wo natürliche Ressourcen zu den limitierenden Faktoren in Ökosystemen gehören, ist ein effizienter Umgang mit diesen knappen Ressourcen ein Evolutionsvorteil. Selbstverständlich sind voll-

ständig geschlossene Kreisläufe Idealbilder. Auch in der Natur gibt es keine perfekten Kreisläufe, aber wenn von Organismen neue Stoffe entwickelt werden, entstehen ko-evolutiv in der Regel auch entsprechende Abbauwege. Organische „Abfälle“ werden im Sinne einer Kaskade von anderen Organismen genutzt, bis hinunter zum Humus bzw. zur Mineralisierung.

- *Diversität, Redundanz, Modularität, Multifunktionalität*
  Die Vielfalt von Lösungen spielt in der Evolution eine wichtige produktive und stabilisierende Rolle, auch wenn weit verbreitete Vorstellungen über einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Vielfalt und ökologischer Stabilität meist grobe Vereinfachungen darstellen. Module wie Organe, Zellen, Organellen und Moleküle ermöglichen Vielfalt auf der Basis eines begrenzten Sets von Strukturen.
- *Multikriterielle (mehrdimensionale) Optimierung in dynamischer Umgebung*
  Die multikriterielle Optimierung gehört vermutlich zu den interessantesten Leistungen von Evolutionsprozessen. Unsere technischen Artefakte sind allzu oft nur mit Blick auf einige wenige Zielfunktionen optimiert und zudem auf wohl definierte Randbedingungen angewiesen. Organismen funktionieren auch in turbulenten Umgebungen. Schnecken schaffen es bspw. ihr Perlmutt auch in einer „dreckigen Brühe“ zu produzieren. Die sich am Evolutionsprozess orientierenden (bionischen) Optimierungsverfahren eröffnen einen Zugang zu multikriteriellen Optimierungsverfahren.
- *Adaptivität, Resilienz, Selbstheilung*
  Störungen, Angriffe usw. sind in der Natur normal. Natürliche Systeme können sich nicht darauf beschränken diese abzuwehren oder ihnen zu entkommen. Sie müssen lernen, Störungen und Angriffe zu verarbeiten, ohne dadurch völlig aus dem Gleichgewicht geworfen zu werden (in dramatische Systemzustände zu geraten). Stichworte betreffen hier den Aufbau und die Stärkung von Abwehr- bzw. Immunsystemen sowie Mechanismen wie Selbstheilung, Resilienz, Robustheit sowie Gestaltungsziele wie Eigensicherheit usw.
- *Selbstorganisation*
  Die Fähigkeit zum Aufbau komplexer Strukturen (fern vom thermodynamischen Gleichgewicht) gehört ebenfalls zu den interessantesten Fähigkeiten von Organismen und Populationen bzw. des ganzen Evolutionsprozesses. Möglichkeiten einer bionischen Umsetzung dieses Prinzips beginnen womöglich schon im anorgani-

schen Bereich bei SAMs („self assembled monolayers“) und bei der Templat gesteuerten Kristallisation. Längerfristig geht es um das „Wachsen-lassen“ komplexer Strukturen und hierarchisch strukturierter Materialien, für das die Templat gesteuerte Kristallisation ja schon ein schönes Beispiel darstellt. Derartige Formen der „Kontextsteuerung“ sparen enorm an Energie, an praktischer Kontrolle und Steuerungsleistung.

Gültigkeit des »Bionischen Versprechens« in Abhängigkeit der Anwendungskontexte

In der Realität bionischer Lösungen können und müssen nicht alle diese Aspekte gleichzeitig erfüllt sein, aber je mehr davon erfüllt werden, desto wahrscheinlicher ist eine gewisse Berechtigung des „Bionischen Versprechens“. Geltung kann dann aber nur beansprucht werden für die Umsetzung der Prinzipien in der jeweiligen Technologie, d. h. die Lösungsangebote. Die jeweiligen Verwendungsbedingungen und Anwendungskontexte können dann aber immer noch zu einem ganz anderen Urteil führen.

Grenzen des »Bionischen Versprechens«

Eine kritische Auseinandersetzung mit den Ursachen und Bedingungen der Berechtigung des „Bionischen Versprechens“ zeigt somit auch klare Grenzen desselben auf. Hierbei spielen insbesondere folgende Aspekte eine zentrale Rolle:

- *Ein Leitbild ist kein Label.*
  Man kann die Bionik als ein Leitbild betrachten, wobei das „Bionische Versprechen“ wichtige Aspekte dieses Leitbilds repräsentiert. Es muss aber von vornherein berücksichtigt werden, dass das Verfolgen eines Leitbildes nicht automatisch auch einen leitbildgemäßen Erfolg zeitigen muss. „Gut gemeint“ muss hier also – wie woanders auch – nicht unbedingt „gut werden“. „Bionisch“ sollte demzufolge auf keinen Fall als eine Art Gütesiegel missverstanden werden. Denn Gütesiegel können nur nach methodisch einwandfrei festgelegten Bewertungsverfahren vergeben werden. Diese existieren jedoch für die Bionik (noch) nicht und es darf bezweifelt werden, ob solche Verfahren überhaupt möglich sind.
- *Jede Technologie/Innovation muss für sich geprüft und bewertet werden*
  Als Elemente möglicher Gefährdungen bzw. des Risikos müssen dabei berücksichtigt werden: zum einen das Gefährdungspotenzial, das von (neuen) technischen Möglichkeiten ausgeht (in der Toxikologie ist dies bspw. die Giftigkeit eines Stoffes), und zum anderen das Gefährdungspotenzial, das von den jeweiligen Anwendungskontexten ausgeht (in der Toxikologie ist dies bspw. die Exposition).

- *Ambivalenz des Opportunismus* (als enorme Form der Selbstbeschränkung)
  Die Nutzung der Solarenergie als Energiequelle und die Nutzung der unmittelbar vorfindbaren Materialien erhöhen zwar die Wahrscheinlichkeit einer nachhaltigeren Lösung, schränken aber die Möglichkeiten der menschlichen Kreativität und Ingenieurskunst zugleich drastisch ein.
- *Jeweitergehendvölligneue Strukturengeschaffenwerden, destomehr erübrigt sich der Hinweis auf deren evolutionäre Erprobtheit.*
  Je stärker das konstruktive Element von bionischen Ansätzen/Innovationen ist, desto mehr verliert das Argument einer evolutionären Erprobtheit seine Gültigkeit. Je eingriffstiefer und wirkmächtiger eine Technologie ist, desto wahrscheinlicher werden relevante Neben- und Folgewirkungen (desto länger die Länge der ausgelösten Wirkungsketten in Raum und Zeit).

2.5 Zwischenfazit Bioniktrends

Selbst wenn wir uns „nur“ auf die Bionik im engeren Sinn konzentrieren, ist es nicht leicht, dieses Feld exakt zu fassen. Das liegt zum einen an der Heterogenität, zum anderen aber auch an der Dynamik der bionischen Forschungen und Entwicklungen. Mit Blick auf die Bioniktrends – also die Dynamik des Feldes – können „drei Hauptentwicklungsstränge der Bionik“ unterschieden werden. Der erste, „funktionsmorphologische“ Strang ist der älteste und widmet sich in erster Linie den Form- bzw. Struktur-Funktions-Zusammenhängen. Der dann einsetzende zweite Strang orientiert sich mehr an den biologischen Formen der Signal- und Informationsverarbeitung und brachte insbesondere in den Bereichen Biokybernetik, Sensorik und Robotik erfolgreiche technische Umsetzungen hervor. Der dritte und jüngste Entwicklungsstrang der Bionik resultiert aus den Fortschritten im Bereich der Nanotechnologien und greift u. a. auf molekulare Prozesse der Selbstorganisation zurück. In diesem Bereich dürften u. E. mittel- bis langfristig die größten Potenziale der Bionik liegen. Ein wesentlicher Grund dafür liegt darin, dass dieser dritte Strang wesentliche Restriktionen der ersten beiden Stränge zu überwinden in der Lage ist.

Heterogenität und Dynamik der Bionik

Drei Entwicklungsstränge der Bionik

Zusätzlich kann seit jüngstem beobachtet werden, dass die drei eben beschriebenen Stränge mehr und mehr aufeinander zulaufen und sich teilweise auch bereits vermischt haben. Diese Konvergenz hat ihr Pendant auch in anderen Wissenschafts- und Technologiebereichen und wird häufig unter den Begriff „converging technologies“ gefasst.

»converging technologies«

Neben den drei Strängen in der Entwicklungsdynamik kann auch der Kern der bionischen Grundidee in sich ausdifferenziert werden. Wir unterscheiden drei Ebenen des „Lernens von der Natur“, wobei gefragt wird, wovon im jeweiligen bionischen Übertragungsprozess abstrahiert wird. Beim „Lernen von den Ergebnissen der Evolution“ werden die in der Natur vorfindbaren und in der Biologie beschriebenen Strukturen und Mechanismen lebender Systeme als Vorbild genommen für technische Produkte und Prozesse. Auf der zweiten Ebene des „Lernens von der Natur“ sind nicht die Ergebnisse der Evolution, sondern der Evolutionsprozess selbst Gegenstand und Ausgangspunkt bionischer Übertragungsprozesse (Evolutionstechnik, genetische Algorithmen). Schließlich wird in der Bionik auch versucht, verallgemeinerbaren Prinzipien des evolutionären Erfolgs, des Aufbaus und der Funktionsweise natürlicher Systeme herauszudestillieren (z. B. Ressourceneffizienz, Opportunismus und Adaptivität), was als dritte Ebene des „Lernens von der Natur“ bezeichnet werden kann.

Drei Ebenen des »Lernens von der Natur«

Schließlich hebt sich die Bionik durch zwei weitere Charakteristika deutlich von anderen Wissenschafts- und Technologiebereichen ab: 1) durch die Faszination, welche sie auf breite Kreise sowohl innerhalb als auch außerhalb der Wissenschaft ausübt, sowie 2) durch den normativen Gehalt, welchen sie mehr oder minder implizit transportiert. Die Faszination dürfte darauf zurückzuführen zu sein, dass Bionik, gleich in welcher Form sie betrieben wird, immer die mit positiven Attributen besetzte belebte Natur zum Ausgangspunkt und in gewisser Weise auch zum Ziel hat. Die „faszinierende“ und „unendlich vielfältige“ Natur soll nachgeahmt, nicht manipuliert oder gar gegen sie angekämpft werden. Der normative Gehalt zeigt sich insbesondere in dem beliebten Verweis darauf, dass die Systeme (bspw. Organismen) der belebten Natur einen Jahrmillionen dauernden Evolutionsprozess durchlaufen haben, in dessen Verlauf sie in vielerlei Hinsicht „optimiert“ worden sind. Diese Optimierung fand dabei nicht nur hinsichtlich des jeweiligen individuellen Systems, sondern auch und vor allem in Bezug auf die System-Umwelt-(Wechsel-)Wirkungen statt. Letzteres kann mit einem gewissen Grad von „Eingepasstheit“ assoziiert werden und lässt die Bionik gerade vor dem Hintergrund der Auseinandersetzungen um nachhaltige Technologien(-entwicklung) als eine vielversprechende Alternative erscheinen.

Das »Bionische Versprechen«

3 TECHNOLOGISCHE PERSPEKTIVEN DES »LERNENS VON DER NATUR«

3.1 Bionik in Technologieprognosen
3.2 Ergebnisse der Kurzfallstudien
3.3 Biomimetik und Technomimetik – Chancen und Risiken der Konvergenztechnologien
3.4 Zwischenfazit Technologische Perspektiven

»Wir müssen nicht glauben, daß alle Wunder der Natur in anderen Ländern und Weltteilen seien. Sie sind überall. Aber diejenigen, die uns umgeben, achten wir nicht, weil wir sie von Kindheit an und täglich sehen.«

JOHANN PETER HEBEL, 1760–1826

3 TECHNOLOGISCHE PERSPEKTIVEN DES »LERNENS VON DER NATUR«

In diesem Kapitel geht es um aktuelle Trends und technologische Perspektiven in der Bionik als Forschungs- und Entwicklungsfeld. Dabei werden zwei generelle Zugänge gewählt: ein Zugang von außerhalb der Bionik und ein Zugang von innen. Zum einen geht es um die Analyse allgemeiner Technologieprognosen und um die Zuordnung bionischer F&E-Felder und Trends zu besonders vielversprechenden Technologiefeldern. Zum anderen sollen über Fallstudien in besonders vielversprechenden Bionikfeldern deren mittelfristigen Potenziale herausgearbeitet werden.

Die Aussagen über Perspektiven und Trends der Bionik werden somit aus drei Quellen hergeleitet: 1) der Analyse von allgemeinen Technologieprognosen und solchen aus anderen F&E-Feldern, 2) der Analyse der wissenschaftlichen und paradigmatischen Dynamik der Bionik und 3) aus der gesellschaftlichen Bedarfs- und Nachfragesituation, also den sogenannten Herausforderungen, denen sich die Bionik gegenüber sieht. Wesentliche Informationen zur gesellschaftlichen Bedarfs- und Nachfragesituation und zu allgemeinen Technologietrends werden somit aus den Technologieprognosen, wesentliche Informationen zur wissenschaftlichen Dynamik und zu den möglichen Lösungsbeiträgen mit Blick auf drängende gesellschaftliche Herausforderungen aus den Fallbeispielen gewonnen.

Wir beginnen mit der Auswertung der Technologieprognosen. Diese wurden dahingehend analysiert, inwiefern sich in ihnen Hinweise finden lassen auf den zukünftigen Stellenwert von Bionik bzw. von Forschungsansätzen, die im weitesten Sinne Natur nachzuahmen versuchen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Abschnitt 3.1 zusammengefasst. Es konnte dabei eine ganze Reihe von Wissenschaftsbereichen identifiziert werden, deren potenzielle (erwartete und erwünschte) Ergebnisse die Anwendung bionischer Ansätze voraussetzen bzw. erfolgversprechend erscheinen lassen.

› s. Kapitel 3.1

Im zweiten Schritt wurden zu einigen dieser Wissenschaftsbereiche Fallstudien durchgeführt, in denen hauptsächlich mittels Literaturanalysen und Experteninterviews geprüft wurde, welche Trends dominieren, vor welchen Herausforderungen die jeweilige Forschungsrichtung steht und inwiefern die Akteure auf das Lernen von der Natur setzen, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Die Ergebnisse der Fallstudien sind in Abschnitt 3.2 zusammengefasst.

› s. Kapitel 3.2

In Abschnitt 3.3 erfolgt dann die Synthese der drei Zugänge mit Aussagen zu besonders vielversprechenden Trends und Perspektiven, sowohl im engeren Feld der Bionik, also dort, wo sich die Akteure mit bionischen Ansätzen explizit identifizieren, als auch im weiteren Feld, in dem dies aus den verschiedensten Gründen nicht der Fall ist.

› s. Kapitel 3.3

3.1 Bionik in Technologieprognosen

»technology foresight« zur Identifikation vielversprechender Forschungs- und Entwicklungsansätze

„Technology foresight“ hat sich als Ansatz und Instrument in den Abteilungen für strategische Unternehmensführung größerer Unternehmen, in Branchenverbänden und in Förderinstitutionen etabliert (VDI 2004, VDI 2006). Dabei werden durchaus unterschiedliche Ziele verfolgt. Die Autoren versuchen, Technologien bzw. Wissenschaftsbereiche zu identifizieren, deren Förderung hohe gesellschaftliche Erträge verspricht; sie suchen nach Herausforderungen, deren technische Lösung als besonders dringlich erscheint; sie versuchen aber möglicherweise auch, die eigenen Ansätze und Kompetenzen und die Projekte, an denen sie arbeiten, als besonders dynamisch und vielversprechend darzustellen.[6]

Nationale Technologieprognosen

Es wurden zum einen von nationalen Regierungen in Auftrag gegebene Studien untersucht, die das Ziel hatten, Entscheidungshilfen zu liefern für die Prioritätensetzung bei der Forschungs-, Technologie- und Innovationsförderung. Dazu gehörten insbesondere Technologieprognosen für Japan (NISTEP 2005), die USA (Popper et al. 1998), Frankreich (MEFI 2006) und China (RGTF 2005).[7] Die chinesische Foresight-Studie wurde berücksichtigt, weil die Literaturanalysen einen großen Anteil chinesischer Forscher an Publikationen zu Bionik weltweit aufwiesen (vgl. Kapitel 4.6 zur internationalen F&E-Landschaft). Die Frage drängte sich auf, ob sich diese Relevanz der Bionik auch in den chinesischen Technologieprognosen niederschlägt.

› s. Kapitel 4.6

Supranationale Technologieprognosen

Weiterhin wurden Zukunftsstudien herangezogen, die von supranationalen Akteuren, insbesondere den Vereinten Nationen und der OECD, in Auftrag gegeben wurden.[8] Besonders interessant, durch ihre allgemeinere Technologieorientierung,[9] ist in diesem Zusammenhang

6 Für eine Einführung in die Schwierigkeiten und Herausforderungen von Technologieprognosen vgl. Salo und Cuhls 2003.

7 Ein Überblick über die vorhandenen internationalen Technologieprognosen findet sich in VDI-Technologiezentrum 2004 und VDI-Technologiezentrum 2006.

8 Vgl. Glenn/Gordon 2006, OECD 2006, IEA 2006

9 In der Studie der Internationalen Energieagentur steht erwartungsgemäß die Entwicklung der Energietechnologien und der Energieversorgung bis zum Jahr 2050 im Fokus. Die UN-Studien konzentrieren sich auf die soziale Entwicklung und die Zukunft der nachhaltigen Entwicklung.

auch die Studie zu Schlüsseltechnologien im Auftrag der EU-Kommission. Denn von der Förderung sogenannter Schlüsseltechnologien wird ein strategisch besonders wichtiger Beitrag zu Innovationen und zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit erwartet (vgl. Key Technologies Expert Group 2005, S. 26ff.).

Unternehmensstudien

Schließlich gibt es auch eine Reihe von öffentlich zugänglichen Zukunftsstudien, die von Großunternehmen mit unterschiedlichen inhaltlichen Schwerpunkten in Auftrag gegeben worden sind. Besonders relevant scheinen hier die Shell-Studie zur Zukunft der Energieversorgung (vgl. Shell 2005), die BMW-Studie zur Zukunft der Mobilität (vgl. ifmo 2006) und nicht zuletzt – wieder mit breiterem Fokus auf „technology foresight" – der von Siemens herausgegebene Bericht „Horizons 2020. A thought-provoking look at the future" (TNS 2004).

Zugrundelegung eines engen und eines weiten Bionikbegriffs

Es soll im Zuge dieser Auswertung von Technologieforesight-Studien nicht nur nach expliziten Bezügen zur Bionik gesucht werden, sondern es soll auch gefragt werden, für welche der in diesen Studien priorisierten technologischen Herausforderungen bionische Ansätze einen Beitrag zu deren Lösung bieten könnten. Diesbezüglich soll zunächst einmal das der Untersuchung zugrunde liegende Verständnis von Bionik geklärt werden: Für eine Strukturierung der aktuellen Bionik-Forschung greifen wir zum einen auf die Einteilung der Gebiete der Bionik in dem von Prof. W. Nachtigall verfassten Bionik-Lehrbuch zurück, welches durchaus dem selbstgestellten Anspruch, eine „Zusammenschau" der Entwicklungen auf dem Forschungsgebiet vorzulegen (Nachtigall 2002, S. VII), gerecht wird und als umfangreichste und detaillierteste deutschsprachige Publikation zum Stand und zur Entwicklung bionischer F&E gelten kann. Zum anderen wird die Strukturierung nach Fachkomitees des BioKoN-Netzwerkes (siehe auch Kapitel 4.2) herangezogen.[10] Beide Gliederungsansätze sind zwar weitgehend kompatibel. Es wird aber auch deutlich, dass die Darstellung im BioKon-Netzwerk sich mit Begriffen wie „surfaces and interfaces" oder „biomechatronics und MEMS" deutlicher um Anschlussfähigkeit an moderne (Hoch-)Technologie-Entwicklungen bemüht (vgl. Tabelle 2), als dies bei Nachtigall (2002) der Fall ist.

Untersuchung zahlreicher Wissenschafts- und Anwendungsfelder

› s. Kapitel 4.2

Berücksichtigung von Hinweisen auf Ansätze des »Lernens von der Natur«

Zur Beantwortung der Frage, ob in einem bestimmten, von den Foresight-Studien herausgehobenen Feld bionische Lösungsansätze zur Anwendung oder in Betracht kommen, kann – neben der Berücksichtigung expliziter Bezugnahmen auf „Bionik"/„Biomimetik" und einem Abgleich mit den in der Tabelle skizzierten Bionikpotenzialen – auch noch untersucht werden, ob ein intuitives (heuristisches) Vorverständnis

10 www.biokon.net

Tabelle 2 — Strukturierung der Bionik nach »BioKoN« und Nachtigall (2002)

BioKoN-Netzwerk	Nachtigall
Architecture, design	Formgestaltung und Design; Bau und Klimatisierung
Light-weight constructions, materials	Materialien und Strukturen
Surfaces and interfaces – structures and functions	
Fluid dynamics, flying, swimming, robotics, DAMS	Robotik und Lokomotion
Biomechatronics, biomedical technology, microelectromechanical systems (MEMS), actuatorics, robotics	Anthropo- und biomedizinische Technik
Sensorics, information processing, communication	Sensoren und neuronale Steuerung
Bionic optimization methods	Evolution und Optimierung ; Systematik und Organisation
	Konstruktionen und Geräte (darunter fällt auch die Nanotechnologie, *Anm. d. Aut.*)
	Verfahren und Abläufe (erneuerbare Energien)

[Quelle: Eigene Zusammenstellung aus Nachtigall 2002 und von www.biokon.de]

der jeweiligen Technologie oder ihrer potenziellen Anwendungen mit der Idee eines „Lernens von der Natur“ gleichzusetzen oder zumindest in Zusammenhang zu bringen ist. So lässt sich bspw. intuitiv ein F&E-Feld „Künstliche Photosynthese“ mit der Nachahmung von Organismen (hier: die Photosynthese betreibenden Pflanzen und Bakterien) verbinden.

Nationale Technologieprognosen

Qualitative und methodische Unterschiede nationaler Technologieprognosen

Die methodischen Grundlagen und Voraussetzungen der Studien sind durchaus unterschiedlich. Die japanische und die chinesische Untersuchung basieren auf der Delphi-Methode, in der möglichst repräsentativ ausgewählte Experten aus Wissenschaft, Gesellschaft und Politik in mehreren Beratungsschleifen mögliche zukünftige Entwicklungen bewerten. Die Ergebnisse dieser Studien sind in der Regel mehr oder minder qualitätsgesicherte Übersichten über eine mögliche Passung („match“) zwischen Herausforderungen auf der einen und entsprechenden (technologischen) Lösungsansätzen auf der anderen Seite („topics“).[11] Diese Übersichten können nach verschiedenen Kriterien

11 Beispiele für solche topics aus der japanischen Studie sind: „A risk management system that utilizes disaster observation satellites, communications satellites, GPS, unmanned aircraft, and so on to observe disastres, understand situations after disastres occur, and respond swiftly. An zweiter Stelle steht: „Technology to forecast the timing and scale of volcanic eruptions by observing and assessing in real time magma conditions inside volcanoes that are likely to erupt“.

der gesellschaftlichen und/oder ökonomischen Bedeutung systematisiert sein. Die französische Studie (MEFI 2006) hatte zusätzlich eine Internetseite geschaltet, auf der jeder Besucher Technologien mit Zukunftspotenzial vorschlagen konnte. Die Aussagen dieser Studie basieren auf Einschätzungen von Expertengruppen aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft, die sich in acht thematischen Gruppen über die Herausforderungen ihres Themenschwerpunktes verständigten und in vier Workshops die Ergebnisse im Plenum diskutierten. Die US-amerikanische Studie basiert auf gezielt interviewten Ansprechpartnern aus Unternehmen, darunter insbesondere Technologievorstände, Vorstandsvorsitzende und Leiter von Planungs- und Entwicklungsabteilungen.

Häufig keine expliziten Bezüge zur Bionik...

... aber vielfältige Bezüge zum »Lernen von der Natur«

Zunächst kann festgehalten werden, dass die in den Technologieprognosen als am wichtigsten identifizierten technologischen Anwendungen häufig keinen expliziten Bezug zur Bionik aufweisen. In den Einschätzungen der meisten Experten scheint die Bionik zumindest keine herausragende Rolle zu spielen. Bezüge zu bionischen Ansätzen werden aber dann deutlich, wenn nicht nur explizite Nennungen der Begriffe „Bionik“ und „Biomimetik“ (und ihrer sprachlichen Abwandlungen) berücksichtigt werden, sondern ein weiteres Verständnis von Bionik zugrunde gelegt wird. Letzteres schließt Konzepte, die mit Begriffen wie „Selbstheilung-organisation“, „intelligent“, „smart“, „biologisch inspiriert“ etc. belegt sind, mit ein. Des Weiteren ergibt sich bei grober, oberflächlicher Betrachtung der Technologieprognosen ein etwas anderes Bild hinsichtlich der Relevanz von Bionik, als bei einer mehr ins Detail gehenden Analyse, welche auch und gerade Unterbereiche größerer Technologiefelder berücksichtigt. Beispielsweise wird Anwendungen aus dem Bereich der Robotik eine sehr hohe Relevanz innerhalb einer der Technologieprognosen zugesprochen. Da die Robotik sich aber in weiten Bereichen ihrer Hard- und Softwareentwicklung am Vorbild des Menschen orientiert (vgl. Nachtigall 2002, Cerman et al. 2005), kann davon ausgegangen werden, dass bionische Ansätze hier eine hohe Relevanz haben, selbst wenn dies nicht expliziert wird.

Schnittmengen von bionischen F&E- und vielversprechenden Technologiefeldern

Die Ergebnisse unserer Suche nach möglichen Schnittmengen zwischen bionischen F&E-Feldern und vielversprechenden Technologiefeldern aus den Technologieprognosen werden in zwei Tabellen dargestellt. In der Tabelle 3 wurden den nach Nachtigall (2002) und dem BioKoN-Netzwerk (www.biokon.net) klassifizierten bionischen Forschungsfeldern Technologien und Anwendungen aus den Technologiepotenzialstudien zugeordnet; die zugeordneten Technologiefelder mussten dabei drei Kriterien genügen:

1) ihnen wurde eine hohe Relevanz innerhalb der Foresight-Studien zugesprochen;
2) sie lassen sich einem der bionischen Forschungsfelder zuordnen;
3) das intuitive Vorverständnis der Technologie oder ihrer Anwendung erlaubt es, sie mit der Idee der Nachahmung der Natur in Verbindung zu bringen.

Tabelle 3 — Bionische Forschungsfelder mit Bezügen zu vielversprechenden Technologien aus den Technologieprognosen

Bionische Forschungsfelder	Technologiefelder mit Affinität zu bionischen Lösungsansätzen
Materialien und Strukturen, Oberflächen	▪ Neue Materialien mittels der Nanotechnologien (NISTEP 2005) ▪ Nachhaltige Materialien (RGTF 2005, Popper et al. 1998, MEFI 2006) ▪ Biomaterialien (Popper et al. 2001) ▪ Komplexe Polymere (Popper et al. 1998) ▪ Neue Materialien mittels des Verständnisses der Selbstanordnung in den natürlichen Prozessen (Popper et al. 1998, MEFI 2006) ▪ Intelligente Materialien (MEFI 2006)
Robotik und Lokomotion	▪ Intelligente Roboter (Popper et al. 1998, NISTEP 2005) ▪ Verlässliche, sichere Maschinentechnologien (RGTF 2005) ▪ Adaptierbare Maschinen (Popper et al. 1998)
Anthropo- und biomedizinische Technik	▪ Gewebeherstellung (NISTEP 2005) ▪ Biologische Pharmazie (RGTF 2005)
Sensoren und neuronale Steuerung	▪ Nanosensoren (NISTEP 2005) ▪ Intelligente Sensoren (NISTEP 2005, RGTF 2005, MEFI 2006) ▪ Biosensoren (Popper et al. 1998)
Informationsverarbeitung und Kommunikation (Arbeitskreis beim BioKoN)	▪ Bioelektronik, Biocomputer (NISTEP 2005, RGTF 2005) ▪ Elektronische Technologien unter Ausnutzung der biologischen Kenntnisse: Nanotechnologien; molekulare Selbstorganisation als Vorbild für die Konstruktion komplexer Systeme (NISTEP 2005) ▪ Neue Netzwerkarchitektur, smarte Netzwerke (RGTF 2005) ▪ Bessere Mensch-Maschine Kommunikation (Popper et al. 1998) ▪ Rechner, die sich an den Menschen anpassen (MEFI 2006) ▪ Autonomic computing (MEFI 2006)
Evolution und Optimierung; Systematik und Organisation	–
Konstruktionen und Geräte (darunter fällt auch die Nanotechnologie)	▪ Selbst-organisierende Technologien (in vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten)

[Quelle: Eigene Recherche]

Es wurden also, ausgehend von bionischen Forschungsfeldern, Bezüge zu Technologiefeldern aus den Technologieprognosen hergestellt.

Besonderheiten der »Rand-Studie«

Die Autoren der Rand-Studie (Popper et al. 1998) – mittels welcher Technologien identifiziert werden sollten, von denen langfristig technologische Durchbrüche erwartet werden – sind den umgekehrten Weg gegangen. Sie haben den Befragten keine vorgefertigte Auswahl an konkreten technologischen Aufgaben vorgelegt (wie bei Delphi-Studien), sondern sie ließen ihre Respondenten von sich aus Technologien (bzw. F&E-Felder) nennen, von denen sie langfristig vielversprechende Durchbrüche erwarteten.

Technologiefelder mit möglichen Bezügen zur Bionik

Die Befragten nannten dabei eine Reihe von Technologiefeldern, bei denen Bezüge zu bionischen F&E-Feldern vermutet werden können: „Computerintelligenz mittels evolutionärer Programmierung und genetischer Algorithmen“, „künstliche Intelligenz“, „Biomaterialien und biologisch hergestellte Materialien“, „Nachbau natürlicher Materialien mithilfe der Nanotechnologien“, „Nachahmung biologischer Produktionsmethoden, um umweltfreundlichere Produktionsprozesse zu kreieren“ (Popper et al. 1998, S. 60). Einer der Befragten formuliert den Bezug zu Bionik auf prägnante Art und Weise: „Biosensors and the marriage of organic materials to inorganics in general have no connection to the work we are presently doing but would seem to be of general importance. The marriage of biology to engineering could lead to development of such things as organic light-emitting diode readouts. Various forms of self-assembly systems that are characteristic of biological systems could then be applied to materials processing or the assembly of mechanical systems.” (*ibid.*, S. 35).

Unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten

Es ist jedoch Vorsicht geboten bei der Interpretation solcher Aussagen. Beispielsweise scheint der Begriff „Intelligenz“ vordergründig synonym zu „Bionik“ zu sein, da in der Regel nur höheren lebenden Wesen Intelligenz zugeschrieben wird. Jedoch ist häufig ungewiss, ob und inwiefern Entwicklungen, die „intelligente Systeme“ zum Ziel haben, tatsächlich die menschliche (oder tierische) Intelligenz nachzuahmen versuchen bzw. dazu in der Lage sind. *Prima facie* ist es jedoch nicht falsch zu vermuten, dass sich die Forschung an intelligenten Systemen durchaus die aus der natürlichen Welt bekannte Intelligenz zum Vorbild nimmt. Inwieweit diese Forschung jedoch unter das Verständnis der bionischen Forschung fällt, muss im Einzelfall überprüft werden und hängt nicht zuletzt auch und gerade von dem konkret zugrunde gelegten Bionik-Verständnis ab. In den Ausführungen zu den Fallstudien wird auf diese Schwierigkeit ausführlicher eingegangen (vgl. insbesondere Kapitel 3.2).

› s. Kapitel 3.2

Supranationale Technologieprognose: EU-Foresight

EU-Studie zu Schlüsseltechnologien

Einen sehr technologieorientierten Zugang wählte auch die EU-Foresight-Studie zu so genannten Schlüsseltechnologien. Die Europäische Kommission hatte die Abteilung „Science and Technology Foresight" ihres Forschungsdirektorats mit der Aufgabe betraut, neu entstehende Forschungsbereiche zu bewerten und ihre Relevanz für die EU einzuschätzen (Key Technologies Expert Group 2005).[12] Für jede der fünfzehn Bereiche wurde eine Studie erstellt, welche einen Überblick über die wissenschaftlichen Herausforderungen und den aktuellen Stand der einzelnen Bereiche liefern sollte. Anschließend wurden die Ergebnisse der Einzelstudien auf einer Konferenz diskutiert und generelle Schlussfolgerungen für die Wissenschaftspolitik gezogen, die in einem zusätzlichen Bericht festgehalten wurden. Darin wurde auch eine Analyse der Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Gefahren („SWOT"-Analyse) der einzelnen Schlüsseltechnologien durchgeführt.

Empfehlungen für langfristige Forschungsagenda

Zu den Politikempfehlungen gehört ein Handlungsplan mit Blick auf eine langfristige Vision für die Forschung. Darin findet sich auch die Forderung nach einem Wechsel zu einer Bio-Ökonomie, d. h. eine Ökonomie, die auf erneuerbaren Ressourcen basiert und eine höhere Ressourceneffizienz aufweist, was wiederum mit geringeren negativen Umweltauswirkungen verbunden wäre. Ausgehend von den Ergebnissen der Einzelstudien formulieren die Autoren Empfehlungen für eine langfristige Forschungsagenda.

Expliziter Verweis auf »Biomimetik«

Mit Blick auf Bionik besonders interessant ist eine Empfehlung der Key Technologies Expert Group (2005), in welcher vorgeschlagen wird, für wissenschaftliche Projekte, die sich nicht eindeutig einer der traditionellen Disziplinen zuordnen lassen – genannt werden die „kognitiven Wissenschaften", die „Komplexitäts- und Sozialwissenschaften" und explizit auch die „*Biomimetik*" –, eine solide Finanzierung bereitzustellen (*ibid*. S. 8, 60). Aus dem Bericht geht jedoch nicht hervor, aus welchen Gründen gerade die Biomimetik gefördert werden soll, und auch nicht, was genau die Autoren unter „Biomimetik" eigentlich verstehen. Dies wird erst deutlicher, wenn die Einzelstudien zu Nanotechnologie (Saxl 2005) und Komplexitätswissenschaften (Priami 2005) mit in die Betrachtung einbezogen werden.

---

12 Die 15 Gebiete waren: „biotechnology", „nanotechnology", „information technologies", „communication technologies", „transport technologies", „energy technologies", „environmental research", „social sciences and humanities", „manufacturing and materials technologies", „health research", „agricultural research", „cognitive sciences", „safety technologies", „complexity research" und „systemic, research in the services sector", Quelle: http://cordis.europa.eu/foresight/kte_expert_group_2005.htm

Nanotechnologie und Komplexitätswissenschaften

Priami (2005) geht davon aus, dass zu den zentralen Herausforderungen heutiger Wissenschaft das Bewältigen von Komplexität gehöre (S. 2). Bisher versuchen wir, komplexe Sachverhalte dadurch zu bewältigen, dass wir sie in ihre Bestandteile zerlegen und die Zusammenhänge zwischen den Bestandteilen zu verstehen versuchen. Priami nennt diese Herangehensweise „reduktionistisch". Für die heutigen Herausforderungen sei das reduktionistische Vorgehen jedoch nicht mehr angemessen. Vielmehr bedürfe es einer „systemischen" Betrachtung der Phänomene. Damit meint der Autor: „The basic idea is to view the systems as something that has its own behaviour not obtained simply by gluing the behaviour of the systems' components of which we already have all the information." (Priami 2005, S. 2). Ein systemischer Ansatz wird hingegen in der Systembiologie („systems biology") verfolgt. Priami (2005) geht davon aus, dass in der (belebten) Natur Ansatzpunkte und Vorbilder für einen angemessenen Umgang mit Komplexität zu finden seien. Einen interessanten Ansatz zum „Meistern der Komplexität" sieht der Autor auch in der Konvergenz der Technologien (S. 5). Hierbei spielt seiner Meinung nach die Biomimetik eine wichtige Rolle: „Also industries in the IT sector are investing in the study of the complexity to try to mimic how nature handle[s] complexity to devise new product that scale one order of magnitude in the size of the problems that they can handle." (S. 5). Aus diesen Gründen resümiert Priami: „The biomimetic approach seems to be very promising in the next future." (*ibid.*, S. 11).

Nanokonstruktionen nach dem Lego-Prinzip

Auch Saxl (2005) nimmt an, dass die Biomimetik viele bedeutende technologische Ansätze der Nanowissenschaften erst ermöglichen wird (vgl. S. 10, 16, 30). Eine am mechanistischen Prinzip orientierte Konstruktion von Makrostrukturen aus Nanopartikeln nach dem Vorbild von Ziegeln oder „Lego-"Bausteinen erweist sich als extrem kompliziert bis unmöglich (*ibid.*, S. 10). Einen Ausweg sieht der Autor im Nachahmen der Natur. Hierzu wäre es aber nötig, besser zu verstehen, wie natürliche Organismen und Prozesse auf der Nanoebene funktionieren. Dies könne am besten durch interdisziplinäre Forschungsverbünde erreicht werden. Die Schlussfolgerung des Autors lautet daher auch:

> *"If, as is postulated, biomimetics is the route to disruptive new products and processes based on nanotechnology and other disciplines, then this ability to work in teams is of great importance to Europe if it is to succeed in researching and applying biomimetics-inspired technologies."*
>
> (SAXL 2005, S. 16)

Bionik als Schlüsseltechnologie?

In ihren generellen Schlussfolgerungen erwähnt die Key Technologies Expert Group (2005) viele Forschungsbereiche, die ähnliche Ziele verfolgen, wie sie auch für bionische Ansätze formuliert werden. Besonders bemerkenswert ist der Stellenwert, welcher der Biomimetik eingeräumt wird. Die Biomimetik, als bestimmte Form einer Orientierung an und eines Nachahmens von Lösungsansätzen der belebten Natur, wird explizit unter den Schlüsseltechnologien der Zukunft eingereiht. Insbesondere werden von ihr Beiträge zu einem angemessenen Umgang mit Komplexität und Innovationen im Nanobereich erwartet. Aus diesen Gründen empfiehlt die Key Technologies Group auch die Anerkennung der Biomimetik als besonders vielversprechenden interdisziplinären Ansatz und eine entsprechende Finanzierung dieser Forschungsrichtung.

Technologieprognosen von Unternehmen

Auf internationalen Märkten aktive Großunternehmen sind darauf angewiesen, gesellschaftliche Trends möglichst frühzeitig zu erkennen, um Gefährdungen rechtzeitig begegnen und Chancen rechtzeitig wahrnehmen zu können. Wir konzentrieren uns hier auf eine breit angelegte Studie, welche von Siemens bei TNS Infratest in Auftrag gegeben wurde (TNS 2004).

Darstellung von Zukunftsszenarien

Entwicklungen, die einen Einfluss auf die Welt von morgen haben können, werden in der genannten Studie in Form von gesellschaftlichen Szenarien dargestellt. Diese sind dabei auf Vorstellungen angewiesen, wie sich bspw. Technologien in den nächsten – hier: 16 – Jahren entwickeln werden. Solche technologischen Projektionen wurden von der Siemens-Abteilung „Corporate Technology“ erstellt und in der hauseigenen Zeitschrift „Pictures of the Future“ veröffentlicht (TNS 2004, S. 151). Das sich aus diesen Projektionen ergebende Bild der zukünftigen Technologien fassten die Autoren der Studie im Abschnitt „Technology Foresight“ zusammen. Bei der Aufzählung der Technologien, die ein hohes Potenzial in der Zukunft haben, erwähnen die Autoren sowohl „Bionik“ als auch „Biomimetik“. Jedoch scheint sich das Bionik-Verständnis der Autoren der TNS-Studie von dem hier zugrunde gelegten hinsichtlich gewisser Aspekte zu unterscheiden.[13]

13 In Bezug auf Biomimetik schreiben sie beispielsweise: “Today, modifications of biological materials – for example, conventional processes like leather tanning and charcoal production – are called ‘biomimetics’. [...] Biomimetics also includes the replication of natural materials.” (TNS 2004, S. 217). Zumindest als Beispiel für biomimetische Technologien wird die künstliche Herstellung von Spinnenseide angeführt (*ibid*., S. 217). Bionik wird womöglich in Anlehnung an den internationalen Sprachgebrauch in Verbindung mit der Informationsverarbeitung erwähnt: “Information bionics – the use of biomolecules as calculating machines” (*ibid*., S. 218).

Viele indirekte Bezüge zur Bionik

Allerdings nennt die Studie eine Reihe von weiteren Forschungsansätzen, welche Vorbilder aus der Natur nutzen bzw. die Natur nachzuahmen versuchen, ohne sie als „bionisch" oder „biomimetisch" zu klassifizieren. Sie finden im Bereich der Medizin[14] (dazu zählen Biochips, Biosensoren, Gewebezüchtung), bei Materialien und Nanotechnologie sowie bei der Verzahnung von Bio-, Nano- und Informationstechnologie Erwähnung.

»materials tailoring«

Bei den Materialwissenschaften wird das so genannte „materials tailoring", also die Entwicklung von Materialien mit „maßgeschneiderten" Eigenschaften herausgehoben. Dieser Forschungsansatz erfordert interdisziplinäre Entwicklungsteams, die aus Materialwissenschaftlern, Physikern, Chemikern, Ingenieuren, Computerwissenschaftlern und interessanterweise eben auch Biologen zusammengesetzt sind (TNS 2004, S. 210). Ein weiterer zentraler Trend mit klaren Bezügen zu Bionik ist das Bioengineering. Die Idee dieser Forschungsrichtung beschreiben die Autoren folgendermaßen: "Taking nature as our model, we use biological materials, concepts and processes to provide revolutionary solutions in technology and healthcare" (*ibid.*, S. 216). Auch beim zentralen Trend „Adaptive Strukturen mit intelligenten Materialien" wird explizit auf Vorbilder aus der Natur rekurriert: "Taking a cue from nature, materials systems which use properties like status monitoring to anticipate breakdowns, repair themselves and adapt their properties to suit their surroundings have been developed" (*ibid.*, S. 218). Innerhalb dieses Forschungsansatzes geht es also um „smarte", Form speichernde („shape-memory") und selbstheilende Materialien. Weit darüber hinaus geht es auch um die Herstellung fehlertoleranter Systeme: „[T]he application of biological principles is driving the successful development of fault-tolerant architectures and error-correcting algorithms" (*ibid.*, S. 238); „A variety of nanoscale analytical devices that intimately combine biological and physical elements have been created to detect and measure a variety of physiological stimuli" (*ibid.*, S. 245).

»bioengineering«

Adaptive Strukturen

Konvergenz von Bio-, Nano- und Informationstechnologien

Die Autoren gehen davon aus, dass einige wichtige technologische Trends sich nur durch das Zusammenwirken bzw. die Konvergenz der Bio-, Nano- und Infomationstechnologien realisieren lassen. Explizit erwähnt werden u.a. ubiquitäre, unsichtbare und intelligente Informationstechnologien, Rechenmaschinen auf der Basis der Quantenmechanik und der Einsatz von Photonik in Alltagsanwendungen. In einigen Forschungsbereichen beschreibt die Siemens-Studie Trends, die auf die Nachahmung von natürlichen Vorbildern keinen direkten

14 Autoren der Studie nennen den Bereich „Health Care"

Bezug nehmen, jedoch auf die Realisierung von Eigenschaften wie Intelligenz oder Selbstorganisation abzielen. Im Bereich „Produktions- und Automatisierungssysteme“ gehören zu den wichtigsten Trends: „Intelligente Gebäude“, „Selbstlernende Algorithmen“ und „Lab-on-a-chip“ (*ibid.*, S. 152). Im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien sehen die Autoren wichtige Trends in ubiquitärer Vernetzung („ubiquitous computing“) und selbstorganisierenden Netzwerken.

»Lernen von der Natur« hat einen hohen Stellenwert

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Forschungsansätze, welche die Natur nachzuahmen versuchen, für die Autoren der Siemens-Studie klar erkennbar einen hohen Stellenwert für die zukünftige technologische Entwicklung haben. Insbesondere heben sie die Inspiration durch die (belebte) Natur im Bereich der Materialwissenschaften heraus. Sie machen aber auch auf einen weiteren Trend aufmerksam: Von der Konvergenz bzw. Verzahnung zwischen Biologie, Chemie, Physik, IT und Nanotechnologie versprechen sich die Autoren zukunftsträchtige Anwendungen.

3.2 Ergebnisse der Kurzfallstudien

Neun Fallstudien

Die im vorherigen Kapitel dargestellten Aussagen von Studien über Technologietrends und sogenannte Schlüsseltechnologien bewegen sich in der Regel zwangsläufig auf einem relativ hohen Abstraktionsniveau. Um konkretere Einsichten und Aussagen zu Bioniktrends und -perspektiven zu gewinnen, ist es nötig, mithilfe von Fallstudien und Vertiefungsstudien mehr ins Detail zu gehen. Der Fokus liegt bei diesem Arbeitsschritt nicht auf den allgemeinen Technologietrends, von denen her dann Bezüge zur Bionik hergestellt werden, sondern auf den bionischen Entwicklungen selbst. Die Fallstudien sollen die Breite des bionischen Feldes demonstrieren, indem in neun – teils sehr unterschiedlichen Bereichen – Bezüge zu bionischer Forschung erläutert werden.

Auswahl der Fallstudien

Die Auswahl der Fallstudien erfolgte nach mehreren Aspekten und Kriterien. Zunächst wurde ein eher weites Verständnis von Bionik zugrunde gelegt. Es wurden also auch diejenigen Felder einbezogen, in denen die belebte Natur als Vorbild genommen wird, selbst wenn dabei nicht explizit auf Begriffe wie „Bionik“ und „Biomimetik“ zurückgegriffen wird. Diese Vorgehensweise ergab sich als Konsequenz aus den Ergebnissen der Analysen der Technologieprognosen. Im Rahmen dieser Untersuchungen ist nämlich festgestellt worden, dass zwar in den Prognosen relativ selten explizit von „Bionik“ oder „Biomi-

metik“ die Rede ist, häufiger jedoch Ansätze und Konzepte beschrieben werden, die in direkter oder indirekter Weise einen Rückgriff auf die Natur als Vorbild für technische Lösungen beinhalten (können). Diese Ansätze und Konzepte sind in der Regel mit Begriffen wie bspw. „biologisch inspiriert“, oder auch „Selbstreparatur“, „-heilung“ und „-organisation“ sowie „intelligent“ oder „smart“ belegt. Um also auch diejenigen Ansätze berücksichtigen zu können, die zwar faktisch bionisch sind, sich selbst jedoch nicht diesem Bereich zuordnen, ist bei den Recherchen zu den Kurzfallstudien gezielt auch nach solchen alternativen Bionik-Begriffen gesucht worden.

Methodische Schwierigkeiten im Umgang mit dem weiten Bionik-Begriff »Lernen von der Natur«

Selbstverständlich eröffnet dieses Vorgehen auch neue Fehlerquellen. Nicht alle Projekte, die auf „intelligente“ oder „selbstreparierende“ technische Systeme abzielen, müssen sich tatsächlich an der „Intelligenz“ oder den „Selbstreparatur-Mechanismen“ biologischer Systeme orientieren. Insofern wird ein Zugang, der auch implizit bionische Ansätze mit einschließt, zwangsläufig zu unscharfen Ergebnissen führen. Nichtsdestotrotz konnte unseres Erachtens auf diese Weise ein zutreffenderes Bild insbesondere der Vielfältigkeit und des Umfangs „bionischer“ Forschung und Entwicklung gezeichnet werden, als es über eine strenge Beschränkung auf explizit bionische Ansätze möglich gewesen wäre.

Fokussierung auf High-Tech-Bionik

Des Weiteren flossen die Ergebnisse der Studien zu den Technologieprognosen und auch ein eigenes Vorverständnis zur Dynamik von Technologien in die Auswahl ein. Forschungs- und technologieintensive Entwicklungen (im Sinne einer „High-Tech-Bionik“) wurden bevorzugt ausgewählt. Auch in dieser Fokussierung kann durchaus ein relevantes Irrtumspotenzial liegen. Immerhin gehören in der Vergangenheit besonders erfolgreiche bionische Innovationen wie bspw. der Klettverschluss oder die Form des Auftrieb gebenden Flugzeugflügels nicht unbedingt zu dem, was man heute unter High-Tech-Bionik verstehen würde. Wir gingen bei der Auswahl der Fall- und Vertiefungsstudien davon aus, dass eine Beschränkung der Betrachtung auf den früheren Hauptstrang der Bionik, d. h. auf die enge Verbindung zwischen einem in der Natur entdeckten Zusammenhang zwischen Form und Funktion und einer darauf aufbauenden fertigungstechnisch relativ einfach im makroskopischen Bereich realisierbaren Lösung, die Zukunftsperspektiven der Bionik unangmessen einengen würde. Es spricht vielmehr einiges dafür, dass sich auch in diesem bionischen Strang zum Zusammenhang zwischen Form und Funktion sowohl die Erkenntnisse als auch die fertigungstechnischen Lösungen zunehmend in den mikro(system)technischen oder gar nanotechnologischen Bereich, also in den dritten Strang, verlagern. Als weiterer Großtrend

wurde aus den Technologieprognosen die zunehmende Bedeutung von „smart technologies“, also einer zunehmenden Intelligenz, Adaptivität und Selbstorganisation technischer Systeme übernommen. Stellvertretend für eine international an Bedeutung gewinnende Gruppe innerhalb der Bionik, die ein entsprechendes Bionik(selbst)verständnis repräsentiert und auch offensiv vertritt, soll hier Bar-Cohen angeführt werden (vgl. Bar-Cohen 2003 und 2005).

»smart technologies«

In der Tabelle 4 sind diejenigen technologischen Trends noch einmal aufgeschlüsselt, die bei unserer Auswahl der Fallstudien schwerpunktartig berücksichtigt worden sind.

Tabelle 4 — Besonders dynamische Technologiefelder mit bionischen Anknüpfungspunkten

IKT und Elektronik	▪ sich selbst-organisierende Medien ▪ Verarbeitung großer Datenmengen ▪ Mensch-Maschine-Schnittstellen ▪ elektronische Technologien unter Ausnutzung biologischer Kenntnisse (Mechatronik, MEMS, molekulare Selbstorganisation als Vorbild für die Konstruktion komplexer Systeme)
Medizin	▪ Prothetik ▪ biokompatible Materialien ▪ Gewebeherstellung
Nanotechnologie	▪ selbstorganisierende Technologien (in vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten) ▪ Biocomputer ▪ Gewebeherstellung
Materialien	▪ biologisch inspirierte Materialien ▪ biokompatible Materialien
Fertigungs- und Produktionsmethoden	▪ adaptive Fertigungsanlagen ▪ Automatisierungstechnik

[Quelle: eigene Zusammenstellung (basierend auf Ergebnissen der Analysen der Technologieprognosen)]

Zusätzlich unterstützt wurde diese Orientierung für die Auswahl von Fallstudien schließlich auch durch die Ergebnisse der Literatur- und Patentanalysen (vgl. Kapitel 4). Selbstverständlich haben auch allgemein methodische Kriterien wie der Zugang zum jeweiligen Feld, die Überschaubarkeit des Feldes und die Eingrenzbarkeit der Aufgabe bei der Auswahl der Fallstudien eine Rolle gespielt.

Berücksichtigung der Literatur- und Patentanalysen

› s. Kapitel 4

Kurzfallstudien wurden zu folgenden Bereichen durchgeführt:

- Sensorik
- Robotik
- Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)
- biologisch inspirierte Materialien
- Biokeramik
- Prothetik
- Tissue Engineering
- „Bottom-up"-Nanotechnologien (Nano2Bio)
- Converging Technologies

Etablierte…

…und aktuelle Felder bionischer F&E

Studien zur Robotik, Sensorik, Prothetik, Biokeramik und zu biologisch inspirierten Materialien wurden u. a. auch deshalb ausgewählt, weil es sich hier um innerhalb der Bionik-Community breit etablierte Bereiche handelt (vgl. Nachtigall 2002, Kapitel 6, 10, 11; Arbeitskreise des BioKoN-Netzwerkes). Die Fallstudien zu Informations- und Kommunikationstechnologien und Nanotechnologien (genauer: Nanobiotechnologien) stehen stellvertretend für Technologieentwicklungen, die sich zwar am Vorbild Natur orientieren, oft aber keinen expliziten Bezug zu Bionik und Biomimetik formulieren.[15] Mit den Fallstudien zur Gewebezüchtung („Tissue Engineering") und – in noch stärkerem Maße – bei den „Converging Technologies" wird der Fokus noch einmal geweitet. Längerfristig erscheint es nämlich immer weniger sinnvoll, Bionik als isolierbares wissenschaftliches und technologisches Entwicklungsfeld zu betrachten. Wenn Zeithorizonte länger als zehn Jahre in den Blick genommen werden, muss die Entwicklung der Bionik zunehmend im engen Zusammenhang mit der Entwicklung der Biotechnologie und der Nanotechnologie betrachtet werden und, noch weitergehender, auch mit den verbleibenden „Converging Technologies" (Informationstechnik und Kognitionswissenschaften).

Schwerpunktmäßig sind folgende Fragen in den Kurzfallstudien behandelt worden:

15 Immerhin spielen diese Forschungsansätze innerhalb der bionischen Forschung eine wichtige Rolle, bspw. sind die Robotik und Sensorik auf IT angewiesen und der „Lotuseffekt" ist letzlich nur nanotechnologisch zu realisieren (vgl. Cerman et al. 2006). Insgesamt wird vielfach die Erwartung geäußert, mithilfe von Nanotechnologien natürliche Materialien leichter nachbauen zu können (Popper et al. 1998). Doch in der einschlägigen Bionik-Literatur werden diese Bereiche kaum behandelt. Weder Nachtigall (2002) noch Kesel (2006) noch Cerman (et al. 2006) widmen der Nanotechnologie oder der IT einen eigenen Abschnitt.

Leitfragen der Fallstudien

- Wie ist die aktuelle Dynamik im Fachgebiet und was sind die zentralen (und vielversprechenden) Paradigmen, Fragestellungen und Lösungsansätze?
- Wie ist die aktuelle Stellung der Bionik im jeweiligen Wissenschafts- und Technologiegebiet einzuschätzen?
- Was sind die technologischen Herausforderungen des jeweiligen Feldes und welche Bedeutung haben bionische Ansätze für die Bewältigung dieser Herausforderungen?

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse geordnet nach den Fallstudien erläutert, bevor dann am Ende dieses Kapitels eine Zusammenfassung und die Formulierung von Schlussfolgerungen für das Feld der Bionik insgesamt erfolgen.

Sensorik

Kaum explizite aber viele implizite Bionikbezüge

Die Sensorik hat in der bionischen Literatur fast schon seit deren Beginn in den 1970er Jahren einen hohen Stellenwert. In der Überblicks- und Lehrbuchliteratur zur Sensorik finden sich hingegen keine direkten Hinweise zu biologisch inspirierten, biomimetischen beziehungsweise bionischen Ansätzen. Die Sensorik wird nach wie vor hauptsächlich als klassisch natur- und ingenieurwissenschaftlicher Forschungs-/Anwendungsbereich aufgefasst und vermittelt.[16] Allerdings finden sich häufig indirekte und implizite bionisch interpretierbare Hinweise.[17] Beispielsweise ist die Analogiebildung „Sinnesorgane" – „Sensortechnik" (also Sensoren als technische Nasen, Augen und Ohren) häufig zu finden (Toko 2000).

F&E zu bionischen Sensoren

Die wenigen Publikationen zu explizit bionischen Sensoren und Sensortechnologien behandeln im Wesentlichen Themen, die bereits seit vielen Jahren besprochen werden und daher auch in der Bionik-Literatur vermehrt zu finden sind:

- Facettenaugen (und der nachgelagerte Signalverarbeitungs- und Steuerapparat) der Insekten und deren technische Umsetzungen[18]
- technische Geruchs- und Geschmackssensoren und „Schnüffler" nach biologischem Vorbild[19]

16 Siehe beispielsweise: Wilson 2005; Tränkler/Obermeier 1998; Gründler 2004; Bernhard 2004; Jackson 2004; Furukawa 2004; Stibor 2005.

17 Bspw. schreibt Jackson (2004, S. 205): „However, artificial neural networks do not use logic. They require no prior knowledge or skills from an expert to be programmed into the software. They are systems that attempt to mimic the learning processes of the brain".

18 Vgl. u. a. Viollet/Franceschini 2005, Ruffier/Franceschini 2005, Toko/Habara 2005, Argyros et al. 2004, Higgins/Pant 2004, Franceschini 2004, Webb et al. 2004, Schenato et al. 2004

19 Vgl. u.a. Settles 2005, Toko/Habara 2005, Webb et al. 2004, Winquist et al. 2004, Li et al. 2001

- Infrarotdetektoren bei Käfern und Schlangen und deren technische Umsetzungen (u. a. Bleckmann et al. 2004, Gorbunov et al. 2002)
- Elektroortung bei schwachelektrischen Fischen (u. a. Bleckmann et al. 2004, MacIver/Nelson 2001)
- Sensor-Aktor-Systeme bei Krebstieren und deren Anwendungen in der Robotik (Ayers 2004, McGruer et al. 2002)
- Längen- und Geschwindigkeitssensor nach dem Vorbild von Muskelspindeln (Jaax/Hannaford 2004)
- Sonar-basierte Sensoren zur mobilen Navigation nach dem Vorbild der Fledermaus (u. a. Carmena/Hallam 2004a, Carmena/Hallam 2004b)
- Dehnungssensoren nach dem Vorbild von Insekten (Sensillen) (Skordos et al. 2002).

Das Spektrum ist relativ klein, gemessen an der schier unüberschaubaren Vielzahl von existierenden Sensoren (bzw. Sensorsystemen) und der jeweils zu messenden Größen.[20]

Begrifflichkeiten in der Sensorik mit Nähe zur Bionik

Zu den im Sinne der Bionik bzw. Biomimetik interpretierbaren Begriffen in der allgemeinen Sensorik-Fachliteratur gehören die hier z. T. schon mehrfach angeführten Bezeichnungen wie „intelligent“,[21] „smart“ (Liu et al. 2005), „lernend“ (u. a. König et al. 2001), „selbstkalibrierend“, „-überwachend“, „-optimierend“, und „-testend“[22] sowie „autark“ (u. a. Mackensen/Kuntz 2004). All diese Funktionalitäten eint, dass sie bisher eigentlich nur auf natürliche Systeme, d. h. in erster Linie auf Organismen (biologische Systeme) angewandt wurden. Technischen Systemen wie Maschinen sprach man bisher weder „Intelligenz“, „Smartheit“, die Fähigkeit zu „lernen“ noch ein „autarkes“ „Selbst“ zu, das etwas aus sich heraus tut. In der Verwendung dieser Begriffe als Attribute für Sensoren und Sensortechnologien manifestiert sich eine mehr oder minder reflektierte Übertragung natürlicher/biologischer Charakteristika auf die jeweiligen Sensoren.

»Intelligenz« = Bionik ?

Allerdings ist hinsichtlich der Geltung solcher Zuschreibungen durchaus Vorsicht geboten. Häufig reduziert sich die „Intelligenz“ eines Sensorsystems auf die Tatsache, dass der Sensor mit anderen Sensoren in einem dezentralen Netzwerk kommunizieren kann,[23] was zwar in der Tat eine sinnvolle technische Neuerung darstellen mag, mit „Intelligenz“ im biologischen Sinne aber wenig zu tun hat. Oft

20 Vgl. die jährlich erscheinenden Übersichten zu Entwicklungen und Anbietern auf dem Sensorikmarkt (in Deutschland) von Schanz (2003, 2004, 2005, 2006).

21 Vgl. u.a. Liu et al. 2005, Meier/Smajic 2005, Mackensen/Kuntz 2004, König et al. 2001

22 Vgl. u.a. Gausemeier et al. 2005, Liu et al. 2005, Kanoun/Tränkler 2004, Prock 2004

23 Vgl. bspw. Mackensen/Kuntz 2004

wird nicht klar, was im gegebenen Fall genau mit „Intelligenz“ gemeint ist.[24] Meist beziehen sich die Intelligenzattribute auf die Art der Signalverarbeitung.[25] Ähnliches gilt für die Verwendung des Attributs „Smartheit“.

Das Präfix »selbst-«

Sensor(system)attribute mit dem Präfix „selbst-“ basieren noch eindeutiger auf einem bionischen Ansatz, auch wenn dieser nicht explizit gemacht wird. Die Idee, etwas aus sich selbst heraus bzw. eigenständig zu tun, ist auf jeden Fall natürlichen beziehungsweise biologischen Ursprungs. Technische Systeme waren seit jeher auf die Bedienung und Beeinflussung durch den Menschen angewiesen (angefangen vom Werkzeug bis hin zum Computer). „Selbstkalibrierende“, „selbstdiagnostische“ und „selbstoptimierende“ Systeme lösen sich von dieser Abhängigkeit von menschlicher Steuerung und werden somit „autarken“ biologischen Systemen (Organismen) ähnlicher.[26]

Herausforderungen

Herausforderungen der Sensorik

Bei den wesentlichen Entwicklungstendenzen in der Sensorik geht es zunächst einmal um Leistungssteigerungen hinsichtlich (Kenny 2005) Empfindlichkeit (Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangssignal), maximaler Nachweisgrenze (extremster zu messender Wert), hoher Auflösung (kleinste messbare Einheit), breitem Arbeitsbereich (auf zu messende Größen/Phänomene bezogen), hoher Selektivität (für zu messende Substanzen vor allem bei Bio- und biochemischen Sensoren), maximaler Linearität (Nichtlinearität = prozentuale Abweichung von der idealen Kalibrierkurve), geringem Rauschen (Hintergrund-Störsignal), kurzer Ansprechzeit (Dauer zwischen Eingangs- und Ausgangssignal) und minimaler Hysterese (Abweichung der Messergebnisse bei zyklischer Änderung der zu messenden Größe). Eine Verbesserung der sensorischen Leistungen hat in den meisten Anwendungsbereichen[27] eine Leistungssteigerung der (technischen) Systeme insgesamt zur Folge, in denen die Sensoren eingesetzt werden. So könnten beispielsweise präzisere Sensoren zur Messung von verfahrenstechnischen Größen wie Temperatur, pH, Konzentration, Druck etc. in einem chemischen Prozess dazu bei-

---

24 Vgl. bspw. Meier/Smajic 2005

25 Vgl. bspw. König et al. 2001

26 „Unter Selbstoptimierung eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieses Systems verstanden. Damit geht die Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionsstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter «Intelligenz», die in der Lage sind, selbstständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren.“ (Gausemeier et al.2005, S. 316)

27 Zu den zahlreichen Anwendungsbereichen der Sensorik siehe auch weiter oben.

tragen, den Prozess näher am Optimum zu fahren, was in der Regel Material, Energie und Zeit spart.

Ansprüche an zukünftige Sensorentwicklungen

Ausgehend von den Rahmenbedingungen ihres Einsatzes werden an Sensoren und Sensorsysteme weitere Ansprüche gestellt. Zukünftige Entwicklungen sollen demnach preiswerter werden, in neuen, zum Teil extremen Umgebungen funktionieren, einfacher in der Handhabung und integrierbar in weitere Sensor-, Informationsverarbeitungs- und Aktorsysteme sowie mobil einsatzfähig sein. Für einige dieser Anforderungen gilt allerdings, dass sie sich kaum gleichzeitig erfüllen lassen (vgl. u. a. Abele et al. 2005, Engin et al. 2005, Rodriguez-Mozaz et al. 2005, Andreescu/Omowunmi 2004, Kanoun/Tränkler 2004).

Unter bionischen Gesichtspunkten besonders erwähnenswert sind die Anforderungen an die Geruchs- (Settles 2005) und Geschmackssensorik (Toko/Habara 2005, Toko 2000). Gerüche und Geschmack basieren auf „komplexe[n] vielkomponentige[n] Stoffgemische[n]" (Gründler 2004). Es muss also eine große Anzahl verschiedener Stoffe in ihren etwaigen Wirkungen parallel erfasst und verarbeitet werden. Dies stellt nicht nur besonders hohe Anforderungen an das Rezeptorelement und den Transduktor, sondern vor allem auch an die nachgelagerte Signalverarbeitung.

Wesentliche Trends der Sensorik

Zu den wesentlichen Trends in der Sensorik gehören 1) die Miniaturisierung der Sensoren und der nachgelagerten Signalverarbeitung,[28] 2) die Integration von Sensoren und Signalverarbeitung[29], 3) drahtlose Sensornetzwerke,[30] 4) sich selbstkalibrierende/-überwachende/-optimierende Sensoren,[31] 5) Multisensorsysteme,[32] 6) Gentechnologie für Rezeptorelemente bei Biosensoren (Rodriguez-Mozaz et al. 2005, Tränkler 2000), 7) „Molecularly Imprinted Polymers"[33] sowie 8) Online- und Inline-Sensorik (Abele et al. 2005).

Obwohl diese Auflistung nicht abschließend ist, verschafft sie einen Überblick über die wichtigsten derzeitigen Entwicklungen. Insbesondere die fortschreitende Miniaturisierung der Sensoren und Sensor(-Controller-Aktor)-Systeme und die Entwicklung drahtloser Sensornetzwerke sind klar dominierende Entwicklungslinien in fast allen Bereichen der Sensorik. Hier folgt die Sensortechnologie augen-

---

28 Micro-/Nanoelectronic-Mechanical Systems (MEMS/NEMS), vgl. Engin et al. 2005, Rodriguez-Mozaz et al. 2005, Gründler 2004, Jackson 2004, Kanoun/Tränkler 2004, Mackensen/Kuntz 2004, Schanz, 2004

29 Single-Chip-Sensorsysteme, Lab-on-a-Chip, vgl. Engin et al. 2005, Jackson 2004, Mackensen/Kuntz 2004

30 Wireless Sensor Networks, vgl. Engin et al. 2005, Puccinelli/Haenggi 2005, Rodriguez-Mozaz et al. 2005, Kanoun/Tränkler 2004, Mackensen/Kuntz 2004

31 Vgl. Gausemeier et al. 2005, Gründler 2004, Kanoun/Tränkler 2004, Prock 2004

32 Vgl. Rodriguez-Mozaz et al. 2005, Gründler 2004, Kanoun/Tränkler 2004

33 MIPs bei bio(chemischen) Sensoren, vgl. Rodriguez-Mozaz et al. 2005

scheinlich den aktuellen Technologieentwicklungen anderer Bereiche. Dies gilt wohl in gleicher Weise für die zunehmende Multifunktionalität der Geräte, was sich in der rasanten Entwicklung von Multisensorsystemen äußert. Sensorik-spezifischer hingegen ist die Tendenz zur vermehrten Entwicklung von sich selbst kalibrierenden und überwachenden Sensoren mit dem Ziel einer besseren Handhabbarkeit und Zuverlässigkeit der Systeme.

Einerseits steht die Erfüllung bestimmter Anforderungen im Widerspruch zueinander, andererseits sind einige Trends als Antworten auf die oben dargestellten Herausforderungen zu verstehen. So ermöglichen drahtlose Sensornetzwerke eine höhere Mobilität und den Einsatz in bisher unzugänglichen Umgebungen. Die Miniaturisierung kann zu einem geringeren Energieverbrauch beitragen (Puccinelli/Haenggi 2005) und erschließt neue Anwendungsfelder, beispielsweise in der minimal- bzw. noninvasiven Medizin („Wearable Sensors") (Engin et al. 2005, Andreescu/Omowunmi 2004).

Robotik

Robotik: Traditionell sehr enge Bezüge zur Bionik

Der Robotik ist in fast allen ihren Ausprägungen ein bionischer Ansatz bereits inhärent. Schon für den Schöpfer des Begriffs „Roboter", Karel Čapek, war der Mensch das Vorbild, nach welchem die „Roboter" (sinngemäß: „Arbeiter") genannte Maschine seines Theaterstücks entworfen wurde (Ichbiah 2005, S. 40). Darüber hinaus sind Roboter (ob sie als solche bezeichnet wurden oder nicht) seit jeher in der Absicht konstruiert worden, die Funktionalität von zunächst Menschen, später aber auch Tieren, mehr oder weniger bewusst nachzuahmen beziehungsweise sogar zu übertreffen. So imitiert beispielsweise der typische stationäre Industrieroboter in der Produktion die Arm- und Handbewegungen des vormaligen Lackierers, Schweißers oder Monteurs, was u. a. durch die Übernahme des Gelenkprinzips möglich wurde. Auch wenn viele der mobilen Roboter zumindest bisher auf Rädern unterwegs sind – eine Art der Fortbewegung, für welche es keine natürliche Entsprechung gibt –, so war ihre Entwicklung doch immer eng mit dem Ziel verknüpft, Systeme zu schaffen, die mehrere für lebende Organismen charakteristische Funktionen erfüllen können, insbesondere die eigenständige (Fort-)Bewegung im Raum, die Wahrnehmung der Umwelt und die Reaktion auf Umweltreize sowie (situationsabhängiges) zielorientiertes Ausführen bestimmter Tätigkeiten. Derartige Fähigkeiten zu einem „Verhalten" im durchaus biologischen Sinne werden bei (mobilen) Robotern durch den kombinierten Einsatz von miteinander verkoppelten Sensoren, („intelligenten") Controllern und Aktoren erreicht (Selverston 2002). Des Weiteren bildete die Entwicklung von „in-

telligenten“[34] Steuerungen seit jeher einen Schwerpunkt in der Robotik, wodurch das Streben nach (künstlichen) Maschinen mit natürlichen beziehungsweise naturähnlichen Attributen zusätzlich unterstrichen wird.

Eine Vielzahl auch expliziter Hinweise auf Bionik

Neben dem in der Robotik durchgehend impliziten Bezug zur Bionik gibt es noch eine Vielzahl expliziter bionischer Bezüge bei konkreten Roboterentwicklungen (siehe dazu beispielsweise: IEEE 2004; Dario et al. 2005 sowie die Übersicht bei Bar-Cohen/Breazeal 2003). Insbesondere sind die Raumfahrtagenturen daran interessiert, Roboter mit autonomen Eigenschaften zu entwickeln (z.B. ESA 2004). Dabei verweisen sie ausdrücklich auf die Autonomie- (ESA 2004) und Selbstorganisationsfähigkeiten (Pettazzi et al. 2005) natürlicher Systeme, die es nachzuahmen gilt. Schließlich gibt es auch einige wenige Entwicklungen, die darauf abzielen, einen kompletten höheren Organismus „nachzubauen“, wie beispielsweise das Projekt zur Schaffung einer künstlichen Ratte (Meyer et al. 2005; Filliat et al. 2004). Allerdings ist man von solchen Zielen noch sehr weit entfernt[35] – meist werden nur einige Komponenten der entwickelten Roboter nach biologischem Vorbild konzipiert und implementiert.

Herausforderungen

Roboterentwicklung lässt sich in drei Komponenten aufteilen: 1) *Aktorik* – damit werden alle Vorrichtungen eines Roboters bezeichnet, welche dieser aktiv zur Fortbewegung in oder zur Manipulation seiner Umwelt einsetzen kann; 2) *Sensorik* – also Vorrichtungen zum Sammeln der Informationen über die Umwelt; 3) *Steuerung* – als Verbindungselement zwischen der Aktorik und der Sensorik. Zentrale Herausforderungen der Robotik lassen sich in allen drei Bereichen identifizieren.

Aktorik

Herausforderungen im Bereich der Aktorik: Die natürlichen Vorbilder sind überlegen hinsichtlich Manövrierfähigkeit, Vielfalt der Einsatzbereiche, Strömungseigenschaften (Fische und Vögel) und Energieeffizienz. Der Einsatz von Robotern ist derzeit in Bereichen problematisch oder gar unmöglich, in denen forminstabile bzw. flexible Teile gehandhabt werden müssen, schnelle und verlustarme Kraftübertragungen notwendig sind, das Energie-Kraftverhältnis besonders klein sein muss sowie aus Sicherheitsgründen in unmittelbarer Umgebung von Menschen.

---

34 Wobei der Begriff der „Intelligenz“, wie bereits erwähnt, oft nicht klar definiert ist. In der Regel ist aber eine Fähigkeit gemeint, welche (höhere) Lebewesen auszeichnet und technischen Systemen eigentlich fremd ist.

35 Abgesehen davon ist fraglich, ob ein solcher „Nachbau“ noch durch unsere Definition von Bionik gedeckt ist, und wie sinnvoll solch ein Projekt überhaupt ist.

Herausforderungen im Bereich der Sensorik: Biologische Systeme zur Sinneswahrnehmung und Signalverarbeitung sind den heutigen künstlichen Systemen überlegen. Es gilt, die Informationen nach ihrer Relevanz zu sortieren und Datenverarbeitungsaufwand zu reduzieren. Die technische Nachahmung von Tasten, Riechen und Schmecken stellt ebenfalls eine große Herausforderung dar.

Sensorik

Herausforderungen im Bereich der Steuerung: Die herkömmlichen Steuerungsmechanismen sind für die Aufgaben, die ein Roboter erfüllen soll, nicht ausreichend. Daher versuchen die Wissenschaftler die Steuerungsprinzipien des Gehirns nachzuahmen, insbesondere die dezentrale Steuerung und das parallele Rechnen.

Steuerung

Die Realisierung von Robotern mit autonomen Eigenschaften (ESA 2004) erfordert allerdings die Bewältigung der Herausforderungen in allen drei Bereichen.

Materialwissenschaften

Bei den Materialwissenschaften handelt es sich um ein Forschungs- und Entwicklungsgebiet, das geradezu dadurch charakterisiert ist, dass die Grenzen zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung schon von Anfang an verschmolzen sind. Ihre Grundlage haben die Materialwissenschaften in den Ingenieursdisziplinen. Ihre Entwicklung war von der wissenschaftlichen Seite her lange bestimmt durch die Festkörperphysik, Physikalische Chemie, die Quantenmechanik und nicht zuletzt die Mathematik. Hinzu kamen mit ihrem Mix aus wissenschaftlichem und (ingenieur-)praktischem Wissen die Metallurgie, Polymerchemie und die Keramik. Die jüngste Geschichte der Materialwissenschaften wurde etwa seit den 1990er Jahren durch starke Einflüsse aus den Bereichen der Informatik („computational material sciences"), der Nanotechnologie und nicht zuletzt der Biologie geprägt. Auch die Materialwissenschaften dürften sich demnach genauso wie die Bionik als Lernfeld anbieten für „Converging Sciences and Technologies".

Verschmelzung von Grundlagen- und angewandter Forschung

Die französische Wissenschaftshistorikerin Bernadette Bensaude-Vincent (2001) hat in einem interessanten Forschungsprojekt die Entwicklung der Materialwissenschaften („materials science and engineering") von ihren Anfängen in den 1950er Jahren bis heute untersucht. Die bionische Idee, von der Natur zu lernen, hat ihr zufolge parallel, aber auch als Teil der Nanotechnologie und der „Computational Material Science" in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts Einzug in die Materialwissenschaften gehalten. Sie weist darauf hin,

Herausbildung der Materialwissenschaften

Orientierung am natürlichen Vorbild

dass schon Feynman 1959 in seiner berühmten Rede „There's Plenty of Room at the Bottom" auf biologische Vorbilder verwies, und dass auch über die „Computational Material Science" Linie bionische Elemente eingebracht wurden. Immerhin spielt bspw. in der Kombinatorischen Chemie die Simulation evolutionärer Prozesse eine wichtige Rolle. Letztlich war es aber die Faszination, die von den Leistungen biologischer Materialien ausging (anisotrop, hierarchisch strukturiert, intelligent, smart, adaptiv, selbstheilend), welche die Orientierung an natürlichen Vorbildern bestimmte. Besonders wichtig war dabei aber die zumindest aufkeimende Chance, mit dieser skalenübergreifenden Komplexität ingenieurtechnisch umgehen zu lernen. Zu den Pionieren dieser Fähigkeit in Form der Templat gesteuerten Kristallisation, die ja zahlreiche Vorläufer hatte in der Kolloidchemie und der Molekularbiologie, gehört sicher Stephen Mann (Mann et al. 1989, Mann 1996).

»Lernen von der Natur« weit verbreitet

Eine Analyse aktueller Review-Artikel[36] bestätigt, dass die Idee des Lernens von der Natur einen breiten Eingang in die Forschung innerhalb der Materialwissenschaften gefunden hat, auch wenn sich nicht alle Forschungsansätze, die sich von der Natur inspirieren lassen, zur Bionik bekennen.

Nanotechnologien und Selbstorganisation

In manchen biochemischen und biotechnologischen Forschungsansätzen sind die Bezüge zur Bionik erst auf den zweiten Blick zu erkennen. Wissenschaftler, die „smarte" und biokompatible Materialien entwickeln, erwähnen selten die Orientierung am Vorbild Natur, aber die Funktionalitäten, welche die Forscher umsetzen wollen, sind in der belebten Natur bereits realisiert. Der Forschungsprozess unterscheidet sich in der Analyse kaum vom Mainstream in der Chemie und Bio(techno)logie: Die Wissenschaftler untersuchen molekulare Strukturen, versuchen die Funktionsweise bestimmter Verbindungen zu verstehen etc. Im Syntheseweg wird hingegen auf Prinzipien der molekularen Selbstorganisation gesetzt und insofern ein bionischer Ansatz verfolgt. Aufgrund diverser Entwicklungen in der Biologie und Chemie, in den Materialwissenschaften und Nanotechnologien eröffnen sich Möglichkeiten, selbstorganisierende und -anordnende Eigenschaften von Molekülen besser zu verstehen und für neue Anwendungen nutzbar zu machen.

Andere in den Review-Artikeln erwähnte Forschungsansätze sind eindeutiger bionisch: Das Ziel der Forscher besteht in diesen Fällen darin, Eigenschaften natürlicher Materialien wie Hydrodynamik, Aerodynamik, Adhäsion (Sanchez et al. 2005) nachzuahmen und in technische Produkte umzusetzen.[37]

36 Vgl. Langer and Tirrell 2004, Anderson et al. 2004, Sanchez et al. 2005.

37 Erwähnte Beispiele sind: Bico et al. 1999, Sanchez 2001, Shin et al. 2003.

Herausforderungen

Ein Beispiel für die Strukturierung zukünftiger Trends in den Materialwissenschaften ist in Tabelle 5 dargestellt.[38] Hierbei wurde vom japanischen National Institute for Material Science auf der ersten Ebene – im Sinne der Differenzierung zwischen „technology push" und „demand pull" – unterschieden zwischen 1) „characteristic-seed materials" (dazu zählen sie Nanomaterialien, supraleitende und magnetische Materialien sowie Halbleiter) und 2) „needs oriented materials" (dazu zählen hier Biomaterialien, Ökomaterialien und Hochtemperaturwerkstoffe für Turbinen und dergleichen). Auf einer zweiten Ebene wird dann unterschieden zwischen 3) „performance seeking materials" (Hochleistungswerkstoffe) (dazu zählen hier Metalle, Keramiken, Verbundwerkstoffe und Polymere) und schließlich 4) „R&D materials" (worunter insbesondere die materialwissenschaftlichen Mess-, Simulations- und Entwicklungsansätze gefasst werden).

Diese japanische Studie sieht ebenso wie die britische Foresight-Studie technologische Herausforderungen in der ganzen Breite der Materialwissenschaften (NIMS 2005; Foresight 2000). Biologischen bzw. bionischen Ansätzen kommt jedoch nur eine marginale Rolle zu. Sie werden in der NIMS-Studie nur in den Bereichen „Biomaterials" (Superbiokompatibilität, Induktion von Zellwachstum und -differen-

Tabelle 5 — Strukturierung der Materialwissenschaften

Characteristic-seeds materials	Needs-oriented materials
(1) Nanomaterials	(5) Biomaterials
(2) Superconducting materials	(6) Ecomaterials
(3) Magnetic materials	(7) High temperature materials for jet engines and gas turbines
(4) Semiconductor materials	

Performance-seeking materials	R&D materials
(8) Metals	(12) Analytical and evaluation techniques
(9) Ceramics	(13) High field generation techniques and applications
(10) Composites	(14) Nano-simulation science
(11) Polymers	(15) New material creation techniques
	(16) Acquisition and launching of materials data
	(17) International standards

[Quelle: NIMS 2005, S. 5]

38 Für eine Alternative vgl. Foresight (2000)

zierung, „nanobiotic materials“, „bioelectronics“, „lab-on-a-chip“) und „ecomaterials“[39] erwähnt.

»The rapidly emerging field of biomimetic materials will form one of the most important technologies of the 21st century«

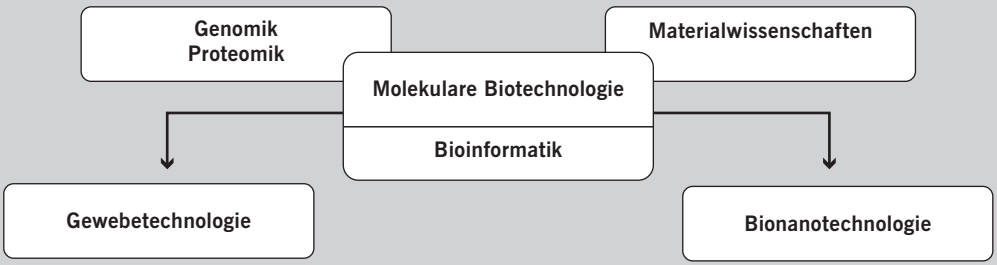
Hingegen schreiben die Autoren des Weißbuches zu Materialwissenschaften der Max-Planck-Gesellschaft: „The rapidly emerging field of biomimetic materials will form one of the most important technologies of the 21st century“ (Rühle et al. 2001, S. 12). Bensaude-Vincent – sie stimmt der Wichtigkeit dieses Trends zu (2001) – erklärt die Relevanz der „biomimetic materials“ damit, dass die Orientierung am Vorbild Natur neue Ansätze in der Forschung eröffnete (Bensaude-Vincent 2001). Produkte würden nicht mehr top-down gefertigt, d. h. aus dem „Block“ geschnitten, analog zum Meißeln einer Skulptur aus einem Steinblock oder durch Umformung. Das Material würde auch nicht mehr feingemahlen bzw. verflüssigt und dann in Form „gegossen“. Vielmehr könnten sowohl die Werkstoffe als auch die Produkte nun „bottom-up“ hergestellt werden, d. h. durch die Anordnung einzelner Atome oder Moleküle bzw. durch deren Selbstanordnung. Nur auf diese Weise erscheint es möglich, derart vielfältig hierarchisch strukturierte Materialien zu schaffen, wie sie bspw. Knochen, Zähne, Perlmutt oder Spinnenseide darstellen. Doch es kommen noch weitere Herausforderungen hinzu. Diese betreffen die Angepasstheit und Anpassbarkeit an die Umwelt, also um adaptive und selbstreparierende Materialien. Ebenso schließt die Begründung von Rühle et al. (2001) direkt an Bensaude-Vincents Argumentation an:

»Bottom-up«-Produktions-Prozesse

> *“‘Mother Nature’ uses highly smart molecules to create her objects by relatively simple and robust processing routes, whereas traditional materials science usually applies sophisticated processing routes to create artificial materials from simple elements”* (S.122).
> *“We see the future of materials technology as the combination of two developments: The convergence of top-down and bottom-up processing to overcome the 30 nm barrier. The connection of traditional semiconductor materials (Si, SiO_2 etc.) with organic/biological materials, possibly with ‘small scale structured’ interfaces. This path would open up plenty of new technological fields”* (*ibid.*).
> *“More generally, biomimetic materials processing is leading to a new interdisciplinary forum which could be called molecular bioengineering. We see three major roots for this new discipline: (i) molecular cell biology with contributions from genomics and proteomics, (ii) materials science, and (iii) bioinformatics/biomodelling”* (*ibid.* S. 123).[40]

39 “[…] purification materials with sophisticated sensing functions need to be developed by using nanotechnology, self-organization, and template reaction“, (*ibid.* S. 7)

Abbildung 1 — Felder des »molecular bioengineering«



[Quelle: nach Rühle et al. 2001, S. 123]

Als die wichtigsten Felder „des molecular bioengineering“ werden angeführt: „new biomaterials“, „tissue engineering“, „bionanotechnology“, „biosensors“ und „biomimicking“ (S. 125).

Technologische Herausforderungen der Materialwissenschaften

Aktuell gehören zu den größten technologischen Herausforderungen der Materialwissenschaften diejenigen aus der Medizintechnik und der Prothetik. Es geht dabei um künstliche Materialien als Substitute für Knochen und Zähne, aber auch für weiche Materialien wie Herzklappen und dergleichen. Ebenso betroffen ist die biokompatible Verbindungstechnik. Klebetechniken und Klebematerialien stellen hier eine besondere Herausforderung dar.[41]

Biokeramik

Abgrenzung bionischer Ansätze

Im Bereich der Biokeramiken zeigt sich besonders deutlich, welche Schwierigkeiten einer trennscharfen Abgrenzung sowohl zwischen bionischen und nichtbionischen Ansätzen innerhalb der Materialwissenschaften existieren. Grundsätzlich lässt sich das Feld der Biokeramiken in folgende Teilbereiche untergliedern, die, je nach Perspektive und Bionik-Verständnis, mal mehr und mal weniger deutlich bionischen Ansätzen zuzuordnen sind (vgl. Grathwohl (2004) sowie Abbildung 2):

---

40 Vor diesem Hintergrund gibt die Max-Planck-Gesellschaft folgende Empfehlungen ab: “The European materials science community should be allied with leading institutes in molecular cell biology and bioinformatics, to establish joint European Research Centres in Molecular Bioengineering supported by national and EC funds… Moreover research platforms in important areas of materials science should be initiated. Possible themes include: ‘Small-scale materials science and engineering’, ‘Bioengineering of bone and cartilage’, ‘Materials processing on biomolecular templates’, ‘Cellular machines and bioengineering’” (2001, S. 124)

41 “It is not yet possible to get durable bonds between artificial organs and human tissue” (Rühle et al. 2001, S. 70).

Biofunktionale Keramiken in der Endoprothetik, also bspw. Implantate von bzw. in Zähnen oder Knochen. Man sollte hier insbesondere dann von „biofunktionaler Keramik“ sprechen, wenn der Herstellungsprozess dieses Materials nicht nach biologischem Vorbild erfolgt, sondern dieses nur eine „biologische Funktion“ erfüllt und ggf. in eine biologische Gestalt gebracht wurde.

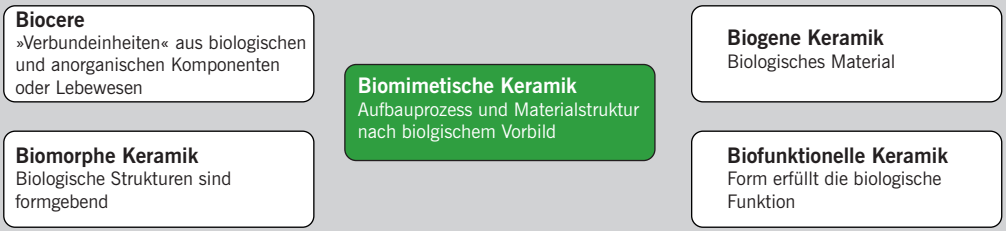
Biogene Keramiken sollten diejenigen Keramiken genannt werden, die von Organismen selbst für ihren Schutz bzw. für Stützfunktionen aufgebaut werden, also Muschel- und Schneckenschalen, die Skelette von Kieselschwämmen oder von Wirbeltieren. Die Erforschung der Struktur, Funktion und Genese dieser Schalen und Skelette gehört zur Grundlagenforschung in der (Technischen) Biologie. Sie liefert aber äußerst wertvolle (oft die entscheidenden) Grundlagen für bionische Forschungen und Entwicklungen.

Biomorphe Keramiken könnten Keramiken genannt werden, bei deren Herstellungsprozess biologische Strukturen formgebend wirken. So wird bspw. derzeit in einer bestimmten Entwicklungslinie Holz zunächst karbonisiert. In den dabei entstehenden Karbonstrukturen bleibt das zelluläre Gefüge von Holz dabei weitgehend erhalten. Diese karbonisierten Strukturen werden anschließend mit Kieselsäure getränkt, wobei letztere mit dem Kohlenstoff eine Verbindung eingeht (Siliziumkarbonatkeramik). Die Frage, ob diese Vorgehensweise „bionisch“ ist oder nicht, kann nicht so ohne weiteres beantwortet werden.

Biomimetische Keramik könnten Keramiken genannt werden, deren Herstellungsprozess biologischen Vorbildern folgt. Die Templat gesteuerte Herstellung von „künstlichem Perlmutt“ für verschiedene Einsatzgebiete in der Oberflächentechnik, die von der Universität Bremen derzeit in mehreren Projekten verfolgt wird, gehört hierher und das Projekt eindeutig zur Bionik (vgl. Fritz et al. 2005).

Biocere schließlich sind Verbundeinheiten (u. a. auch Verbundwerkstoffe) aus einer biologischen und einer anorganischen Komponente. Die biologische Komponente kann dabei von der molekularen Ebene (bspw. Enzyme oder DNA) bis zu lebenden Bakterien reichen. Wenn die anorganische Komponente nichts mit biologischen Vorbildern zu tun hat, handelt es sich gemäß des hier verwendeten Bionik-Verständnisses eher um Biotechnologie. Wenn es sich jedoch um einen Verbund zwischen einem Computerchip und einer Nervenzelle handeln würde, würde eine Abgrenzung schon schwieriger, da es dann in Richtung „converging technologies“ ginge.

Abbildung 2 — Strukturierung des Feldes »Biokeramik«



[Quelle: eigene Darstellung]

Herausforderungen

In der Fachliteratur[42] werden folgende zentrale Trends beschrieben: künstliche Knochen und Zähne, Entwicklung bruchzäher Keramiken sowie die Nachbildung optischer Eigenschaften.

Künstliche Knochen und Zähne

Bei der Entwicklung von künstlichen Knochen und Zähnen geht es um die Herstellung von resorbierbaren und das Zellwachstum induzierenden Keramiken. Der Fokus der Forschung liegt auf der Nachbildung der Hierarchieebenen bis in den Nanometerbereich (hierarchische Strukturierung) und der Interaktion mit Zellen. Nur mit der erstgenannten Strategie können die bisher in der Keramik nicht realisierbaren Eigenschaftskombinationen wie bruchfest und bruchzäh realisiert werden. Bei letzterem spielen die 3D-Struktur auf den verschiedenen Ebenen, also im Meso-, Mikro- und im Nanometerbereich, sowie die Oberflächeneigenschaften eine große Rolle. Diese dienen als starker Mechanismus, um Zellwachstum anzuregen und zu kontrollieren (Stevens and George 2005).

Schwämme als Vorbild

Bei der Entwicklung bruchzäher Keramiken dienen vor allem Muschelschalen aber auch Schwämme mit ihren herausragenden mechanischen Eigenschaften als biologisches Vorbild. Auch hier wird die Nachbildung der Hierarchieebenen angestrebt, um die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erhalten (Mayer 2005).

Zu optischen Eigenschaften natürlicher Keramiken, deren technische Nachbildung angestrebt wird, zählen vor allem die speziellen Formen der Lichtleitung und -sammlung, wie sie bspw. in Schwämmen oder Seesternen erfolgt. Wichtige Faktoren sind die Materialeigenschaftskombinationen sowie der Aufbau in Kompartimenten (Weiss 2003; Lee and Szema, 2005).

42 Special Section „Materials and Biology“ der SCIENCE-Ausgabe vom November 2005 (Vol. 310) sowie Januar 2006 (Vol. 311).

Bedeutung von Bild gebenden Verfahren

Zu Entwicklungen, die dem Feld Biokeramik neue Impulse verleihen könnten, gehören zum einen neue Bild gebende Verfahren (Klein-Winkel-Röntgenstrahlung, Infrarot-Spektroskop-Bilderzeugung und Mikrotomographie). Sie ermöglichten es, neue Einsichten in die Struktur und Eigenschaften natürlicher Nanokomposite wie Perlmutt, Kollagen oder Holzzellwände und teilweise in das Mineral-Kollagen-Komposit der Knochen zu erlangen. Zweitens ist es aufgrund der Nutzung von Methoden aus der Biochemie nun möglich zu verstehen, wie die Moleküle entstehen und reagieren. Damit kann unter anderem die Biomineralisation mitverfolgt werden.

Selbststrukturierende Verfahren

Schließlich liegt ein großes Potenzial in der Entwicklung von selbststrukturierenden Verfahrenswegen. Bei den meisten Organismen erfolgt die Biomineralisation über einen amorphen Precursor mit speziellen Eigenschaften. Die Untersuchung dieses Wirkungsmechanismus eröffnet großes Potenzial für das Verstehen und den Einsatz der Templat gesteuerten Biomineralisation. Allerdings ist noch nicht genug über die Kristallisationsprozesse bekannt und sie können dementsprechend noch nicht in vollem Maße umgesetzt werden.

Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

Hohe Dynamik bei IKT

Das Gebiet der Informations- und Datenverarbeitung sowie der Telekommunikation zeichnet sich seit Jahren durch eine hohe Dynamik aus. Neben großen und weit reichenden Erfolgen stehen die IKT-Wissenschaftler vor einer Reihe von Herausforderungen. Dies betrifft vor allem Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Kapazität, der zunehmenden Komplexität und der voranschreitenden Miniaturisierung IuK-technologischer Systeme.

Traditionelle Problemlösungen vs. neue Komplexität

Dort, wo die traditionellen Problemlösungen an ihre Grenzen stoßen, wird nach alternativen Lösungsansätzen gesucht. Viel versprechende Alternativen werden dabei in der Quantenmechanik (bspw. Quantencomputer), in der Optik (bspw. Glasfaserkabel) und eben auch in der Biologie gesehen (bspw. Evolutionäre Techniken, DNA-Computer, Nachahmung des Gehirns bzw. des Nervensystems). Das Interesse an den von der Biologie inspirierten Lösungen bezieht sich nach Sörensen (2004) interessanterweise in ähnlicher Form auch auf die Komplexitätsproblematik, wie dies bei Bensaude-Vincent mit Blick auf die Materialwissenschaften der Fall ist: "... the general popularity of biology is a consequence of a general scientific movement towards theories of systems, complexity, and processes. This development not only describes the historical genesis of biomimetics but also – so I will claim – its raison d'être" (S. 211). Wobei die Idee, Natur als Quelle für Innova-

tionen und Lösungen auf dem Gebiet der Informationswissenschaft zu verwenden, bereits auf Turing in den 1940er Jahren zurück geht (vgl. Paun 2004).

Zahlreiche Forschungsprojekte auf den verschiedensten Ebenen der IKT verwenden den Begriff „Bionik“ bzw. „Biomimetik“ nicht. Stattdessen wird auf Begriffe wie „bio-inspired“ oder „evolutionär“ zurückgegriffen (bspw. „evolutionäre Algorithmen“, „evolvable hardware“, „bio-inspired computing“) (Paun 2004, de Casto 2005). Paradigmatisch hierfür stehen der von IBM verfolgte Ansatz „Autonomic Computing“[43] oder der von der DFG geförderte Schwerpunkt „Organic Computing“:[44] Sie verweisen ausdrücklich auf das vegetative Nervensystem (Kephart and Chess 2003), Verhalten von Lebewesen (Müller-Schloer et al. 2004a), verwenden genetische Algorithmen (Trumler 2006), bezeichnen sich aber nicht als bionisch oder biomimetisch.

Begriffe »Bionik« und »Biomimetik« werden nicht verwendet…

…stattdessen jedoch »evolutionäre Algorithmen«, »evolvable hardware«, »organic computing«

In seiner vielbeachteten Dissertation „Ambient Ecologies – Toward biomimetic IT“ reflektiert Sörensen auf den Unterschied zwischen „bio-inspired“ und „bionisch“ und hebt dabei, neben der schon erwähnten Komplexität, Funktionalitäten wie Selbstorganisation und Adaptivität als konstitutiv für den biomimetischen Ansatz heraus (Sörensen 2003, S. 76; Sörensen 2004):

> *“So the difference between merely ‘inspired’ approaches and biomimetics is that biomimetic models relate to models of complex adaptive systems in non-trivial ways. Biomimetic models must capture essential traits of self-organization and adaptivity by investigating complex adaptive systems so that the same general laws of self-organized adaptivity will govern both technological and natural complex systems.”*
>
> (SÖRENSEN 2003, S. 76)

Indirekte Bezüge zur Bionik

Es zeigt sich also, dass im Bereich der IKT, ebenso wie in anderen Bereichen auch, zwar die Verwendung der Begriffe „Bionik“ und „Biomimetik“ kaum verbreitet ist. Allerdings haben sich innerhalb des Feldes viele Teilbereiche herausgebildet, die klar erkennbar natürliche Systeme als Vorbild für die Entwicklung und/oder Optimierung technischer Systeme nutzen. In vielen Fällen offenbart sich das „bionische Wesen“ dieser Ansätze bereits in den Begriffen, mit welchen die Ansätze bezeichnet werden: „natural computing“, „evolvable hardware“ etc.

43 Vgl. Kephart and Chess 2003, Internet: http://www-03.ibm.com/autonomic/about.html

44 DFG Schwerpunktprogramm 1183, besteht seit 2004. Internet: http://www.organic-computing.de/SPP

Herausforderungen

»ubiquitous computing«

Zu den großen Herausforderungen gehört bereits seit längerer Zeit das rasante Ansteigen der zu verarbeitenden Datenmengen und eine sich mit Bezug auf die Vielfalt und Anzahl immer weiter verbreitende „Computerisierung" („ubiquitous computing").

Grenzen der Datenverarbeitung und Miniaturisierung

Gleichzeitig zeichnen sich physikalische Grenzen der traditionellen Ansätze ab. Dies gilt insbesondere für die fortschreitende Miniaturisierung, bei der die Materialleistungen (bspw. bei Silizium in der Herstellung von Chips) an ihre Grenzen geraten (BSI 2003). Zum einen wird die Geschwindigkeit, mit der ein Prozessor die Rechenoperationen durchführt, auf Grund von thermischen Gesetzen unter 5 GHz bleiben müssen (Microsoft 2005, S. 14). Zweitens kann die Geschwindigkeit, mit welcher Daten zwischen Speichermedium und Prozessor ausgetauscht werden, nicht beliebig erhöht werden (*ibid.*). Drittens stößt die Verkleinerung der Transistoren auf den Chips spätestens dann an ihre Grenzen, wenn diese sich der Größe von Atomen annähern, weil dann quantenmechanische Effekte dominieren, die sichere Vorhersagen nicht mehr zulassen. Diese Grenze kann bereits in 10 bis 15 Jahren erreicht werden (*ibid.*; Fulk 2002).

Herkömmliche Lösungsansätze nur beschränkt zukunftsfähig

Doch die Computerisierung und die Minituarisierung führen zur Komplexität der zu bearbeitenden Aufgaben und der operativen Systeme. Diese zu gestalten und ihre Funktionen aufrechtzuerhalten, wird neben den anderen Aufgaben eine der größten Herausforderungen im Bereich IT sein. Die Erfolgsaussichten der herkömmlichen Lösungsansätze sind derzeit allerdings beschränkt. Eine wesentliche Hürde, die sich den Forschern stellt, dürfte u. a. in der Maschinenzentriertheit der heutigen IT-Strukturen liegen. Die Initiative „Organic Computing" spricht diesbezüglich von der „algorithmischen Teilung der Arbeit" zwischen Mensch und Maschine: Der Mensch entwirft Algorithmen, ist damit für das Kreative zuständig, und die Maschine führt das vorgegebene Programm Schritt für Schritt aus.[45] Der Nachteil dieser Arbeitsteilung besteht darin, dass der Mensch jeden Schritt der Maschine nachvollziehen können muss, um im Falle einer Fehlfunktion den Fehler finden zu können. Diese Top-Down-Vorgehensweise setzt voraus, dass der Forscher einen Überblick über die gesamte Struktur hat und davon ausgehend ein einzelnes Problem der Struktur lösen bzw. diese verbessern kann. Es leuchtet ein, dass bei übersichtlichen Algorithmen diese Arbeitsweise zwar funktionieren mag. Je komplexer aber die IT-Anwendungen sind, d. h., je länger ihre Algorithmen werden, umso aufwändiger wird es für den Programmierer, den Überblick über die einzelnen Schritte zu behalten.

45 siehe hierzu auch: www.organic-computing.org

Zusätzlich zeichnen sich die Grenzen traditioneller Ansätze aus ökonomischer Perspektive ab: Mit der Komplexität der IT-Anwendungen und ihrem Einsatz in sicherheitsrelevanten Bereichen (wie Automobilindustrie, Medizin oder Luftfahrt) wird ihre Entwicklung immer aufwändiger. Heutige Unternehmen stellen immer mehr Entwicklungspersonal ein,[46] was die Entwicklungskosten in die Höhe treibt. An einem bestimmten Punkt wird diese Praxis auf wirtschaftliche Grenzen stoßen (Müller-Schloer et al. 2004b).

»Self-X«-Eigenschaften

Ein viel versprechender Trend, um diese Herausforderungen zu lösen, liegt in der Entwicklung von IT-Systemen mit „Self-X"-Eigenschaften (Kephart and Chess 2003, Kasinger 2005):

› s. Kapitel 6.3 | S. 194
› s. Kapitel 6.4 | S. 204

- selbstkonfigurierend
- selbstoptimierend
- selbstheilend
- selbstschützend

Die „Self-X"-Ansätze lassen sich als bionisch auffassen, denn es gilt, die Probleme der Komplexität durch das Nachahmen von Eigenschaften natürlicher Systeme zu lösen.

Prothetik

Prothetik im Rahmen eines weiten Bionikverständnisses

Sowohl innerhalb der Bionik spielen Entwicklungen aus dem Bereich der Prothetik eine wichtige Rolle als auch umgekehrt. Nachtigall schreibt, die Anthropotechnik, die Anpassung von Maschinen an den Menschen und seine Bedürfnisse, sei eine der „vornehmsten Forschungsaufgaben auf dem Gebiet einer erweiterten Bionik" (Nachtigall 2002, S. 287). Damit fasst er die bionischen Bezüge sehr weit und nennt als Beispiel die Entwicklung von Automobilen der Zukunft, die eine „biomechanisch angepasste Optimalhülle" für das „biomechanische System Mensch" darstellen (Nachtigall 2002, S. 288).[47]

»bionics« im angelsächsischen Raum tlw. Synonym für »Prothetik«

In der Literatur zur Prothetik werden die Begriffe „Bionik" und „Biomimetik" intensiv verwendet. Insbesondere im angelsächsischen Sprachraum werden in der Regel mit dem Begriff „bionics" sogar *ausschließlich* im weitesten Sinne prothetische Systeme gemeint. Stellvertretend für eine Vielzahl von Verwendungsweisen

46 Nach Angaben von IBM wird bei den heutigen Unternehmen der IT-Haushalt zu 70% für Arbeitskraft ausgegeben (Enterprise Management Associates 2006, S. 1)

47 Schon in der vom VDI 1993 herausgegebenen „Technologieanalyse Bionik. Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien" wird die „bionische Prothetik" zu den Feldern der Bionik gerechnet und werden als Unterkategorien die „Funktionsoptimierung von Prothesen", „einwachsende Prothesen" und die „Verbesserung der Verträglichkeit" angeführt (VDI 1993, 15).

der Begriffe seien hier Herr et al. (2003) angeführt. Biomimetik steht dabei für das Verstehen und technische Umsetzen (nicht unbedingt eins zu eins Kopieren) von Funktionsweisen des menschlichen Körpers.

Vom Holzstock als Beinprothese bis zur exakten Kopie menschlicher Organe und Gliedmaßen

Die beiden Begriffe werden innerhalb der Prothetik-Forschung zwar nicht einheitlich gebraucht, aber ihre verschiedenen Verwendungsweisen können durchaus integriert werden. Früher waren Prothesen nur von der Form natürlicher Gliedmaßen inspiriert. Sie wurden sozusagen in formaler Analogie zum Original gefertigt, später aber mit zunehmender Erkenntnis und wissenschaftlicher Entwicklung schrittweise verbessert. Der Stock als Beinprothese war eher Analogie als Kopie. Mit dem wissenschaftlichen Fortschritt in den verschiedenen Bereichen der Biologie und der Medizin und der damit verbundenen Möglichkeit des tieferen Verständnisses wurde über die Zeit aus der Analogie das Ziel der Kopie und der Imitation. Auf der Ebene der praktischen Entwicklung von Prothesen lassen sich Analogie und Kopie zwar nicht immer so klar trennen, es ist aber offensichtlich, dass die Erweiterung des Wissens die Kopie zunehmend in den Bereich des Möglichen rückt. Aus dieser Perspektive könnte man in der Prothetik sowohl die Betonung der schrittweisen Verbesserung als auch das Ziel der biomimetischen Kopie unter dem Oberbegriff der Bionik zusammenfassen.

Herausforderungen

Kopie als Ziel der Prothetik

Das zentrale Ziel der Prothetik-Forschung liegt darin, sich an die natürlichen Funktionen von Organen oder Gliedmaßen anzunähern, bis es sogar möglich ist, sie nachzubauen. „However, in the next several decades continued advances in human-machine neural interfaces, muscle-like actuators and biomimetic humanoid control schemes may result in dramatic improvements in the quality of life of the physically challenged" (Herr/Whiteley/Childress 2003). In der Debatte über die Zukunft der Prothetik spielen drei Stichworte eine zentrale Rolle: neuronale Steuerung, biohybride Systeme und muskelähnliche Bewegungsauslöser (Aktoren).

Beispiel Sehprothesen

Um Entwicklungstendenzen aufzuzeigen, werden im Folgenden einige Beispiele aus der Grundlagenforschung beschrieben.

Im Bereich Sehprothesen geht es zum Beispiel darum, das Sehvermögen unter Umgehung der Retina und des Sehnervs wieder herzustellen. Dabei werden Daten von einer Kamera direkt an einen im Gehirn implantierten Mikroprozessor geliefert, der wiederum den für das Sehen zuständigen Teil des Gehirns stimuliert und so optische Eindrücke generieren soll. Die Technologie wurde von der portugiesischen Firma

Dobelle Institute entwickelt.[48] Blinde, die ihr Augenlicht erst nach der Kindheit verloren haben, berichten, dass sie nach Implantation wieder hell und dunkel unterscheiden können (Nsanze 2005).

Beispiel künstlicher Hippocampus

Aktuell wird ebenfalls ein künstlicher Hippocampus entwickelt. Darunter versteht man einen Chip, der das Gehirn nicht nur anregt, sondern auch die Aktivitäten eines beschädigten Hippocampus, also im Wesentlichen Gedächtnisleistungen, übernimmt. Solche Forschungsbemühungen auf dem Gebiet der neuronalen Steuerung reichen über das Gebiet der Prothetik weit hinaus in den Bereich der „Verbesserung" der entsprechenden Leistungen. Mit einem für den Menschen einsatzfähigen Chip ist nach Angaben der forschenden Wissenschaftler aber nicht vor zehn Jahren zu rechnen (Nsanze 2005).

Mit Gedanken Rollstühle steuern

Die Firma Cyberkinetics arbeitet eigenen Angaben zufolge an einem Chip mit dem Namen „Braingate", der es seinen Trägern ermöglichen soll, durch Gedanken Dinge zu steuern. Das Chip-System besteht aus einem Sensor, der in den „Motor Cortex" des Gehirns implantiert wird und einem Apparat, der die Gehirnsignale interpretiert. Werden bestimmte Tätigkeiten gedacht, so gehen die Signale nicht in die Gliedmaßen, sondern werden vom Chipsystem aufgenommen, gesendet, interpretiert, übersetzt und an einen Computer geleitet, der auf gedankliche Anweisung hin bedient wird. Der Chip ist für Querschnittsgelähmte konzipiert und befindet sich in der klinischen Testphase. Zukünftig sollen mit dem Chip unter anderem Rollstühle und Exoprothesen gesteuert werden.[49]

Exo-Prothetik

Auch im Feld der Exo-Prothetik[50] gibt es Bemühungen, neue Prothesen mit gezüchtetem Gewebe zu verbinden. So entwickelten etwa Hugh et al. am Massachusetts Institute for Technology kleine Roboter, die von Froschmuskeln angetrieben werden (Rötzer 2001). Die Muskeln sind mit den mechanischen Teilen verbunden und bewegen sich auf Reizung mit künstlichen Stromstößen. Das langfristige Ziel der Wissenschaftler ist es, bei Exoprothesen die momentan verwendeten, vergleichsweise schweren Elektromotoren durch gezüchtete menschliche Muskeln auszutauschen (*ibid.*). In der dazugehörigen Publikation ordnen die Wissenschaftler ihre Forschung zwar dem Gebiet der Biomechatronik zu, im Schlagwortindex findet sich aber auch das Schlagwort Bionik (Herr/Dennis 2004). Weitergeführt wird diese Entwicklungsrichtung unter dem Stichwort „biohybride Körperteile". Wissenschaftler hoffen, aus gezüchtetem Gewebe, verlängerten Knochenstümpfen, Titanprothesen und einer neuen Generation von im-

48 Sie ist über ihre Website www.artificialvision.com/ allerdings nicht mehr erreichbar.

49 Für eine ausführliche Beschreibung siehe www.cyberkineticsinc.com.

50 Das sind Prothesen, die sich außerhalb des Körpers befinden.

plantierten Sensoren Prothesen zu schaffen, die über Gehirnsignale gesteuert werden können (Versweyveld 2004).

Rolle der Nanotechnologien in der Prothetik

Nanotechnologien werden ebenfalls bei der Entwicklung zukünftiger Prothesen eine wichtige Rolle spielen, etwa bei der Verbindung von Exoprothesen mit künstlichem Gewebe, bei der Biofabrikation von Implantaten (National Institutes of Health Bioengineering Consortium 2000) oder der Entwicklung von künstlichen Muskeln für Exoprothesen (Bar-Cohen 2001). In den erwähnten Publikationen werden durchaus auch Bezüge zur Bionik hergestellt. Letzteres bezieht sich im Bericht des Health Bioengineering Consortium nur auf zellenbasierte Arzneimittelträger. Bei Bar-Cohen heißt es dagegen ausdrücklich: „Practitioners in biomimetics, a field where robotic mechanisms are developed based on biologically inspired models, are particularly excited about these materials" (Bar-Cohen 2001, S. 45).

Gewebezüchtung

Gewebezüchtung spielt in der Bionik-Community nur am Rande eine Rolle. So taucht sie als bionisches Feld im umfassenden Werk von Nachtigall (2002) ebenso wenig auf wie in der Technologieanalyse des VDI (1993). Auch in einer aktuellen Broschüre des BMBF zur Bionik ist die Gewebezüchtung nicht explizit genannt. Lediglich in einem Unterkapitel zu „Menschen und Material" werden die Prinzipien des Knochenwachstums als Vorbild für die Entwicklung von Hartgewebeimplantate genannt (BMBF 2005). Die Europäische Raumfahrtbehörde erwähnt in ihrer Übersicht zu „biomimicry" Gewebezüchtung nur am Rande. Im Kapitel „Prozesse" werden die Zellteilungsprozesse als beispielhafte Vorgänge zur „Bottom-up"-Produktion von Materialien genannt. Die organismische Produktion von Gewebe durch Zellteilung und Ausdifferenzierung wird in Verbindung mit Nanotechnologie und der Hoffung auf künstliche Reproduktion dieser Vorgänge thematisiert.

Gewebezüchtung als Randthema der Bionikforschung in Deutschland

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert aktuell in einem Schwerpunkt die Themenfelder „Tissue Engineering" und „Biologischer Ersatz von Organfunktionen" unter dem Oberbegriff „Regenerative Medizin", ohne dabei einen Bezug zur Bionik oder Biomimetik herzustellen (BMBF 2005).

»tissue engineering« als fester Bestandteil angelsächsischer Bionikforschung

Hingegen wird im angelsächsischen Raum Gewebezüchtung („tissue engineering") als ein typisches Beispiel bionischer Forschung angesehen. Dies ist bspw. beim U.S.-amerikanischen National Institute of Dental and Craniofacial Research (NIDCR) der Fall (NIDCR 2005). Biomimetics wird dort vorgestellt als die Wissenschaft, in der Biologie und Ingenieurwissenschaft zusammenkommen, um die biologischen

Prinzipien zu erforschen, die zur Herstellung von bioinspirierten Materialien zur Gewebezüchtung notwendig sind (NIDCR 2005, S. 1).

Biomimetische Züchtung von Zähnen und Knochen

Noch direkter stellen Unternehmen den Bezug von Gewebezüchtung zur Bionik über ihre Produkte her. Die Firma Dentigenix, welche die Züchtung von ganzen Zähnen und Zahnschmelzkomponenten beabsichtigt, verweist auf biomimetische Methoden als Elemente ihrer Entwicklungsverfahren. Das Unternehmen Biomimetic Pharmaceuticals plant die Züchtung von Gewebe zum Ersatz von beschädigten Knochen.

Nanotechnologien und Gewebezüchtung

Auch die Autoren, die Gewebezüchtung mit Nanotechnologie in Verbindung bringen, stellen solche Bezüge zur Bionik her (Prokop 2001, Wen/Shi/Zhang 2005). Wenn von Bionik im Zusammenhang mit nanotechnologischen Methoden zur Züchtung von menschlichem Körpergewebe die Rede ist, geht es meist um die Beherrschung biologischer Molekülbildungs- und -assemblierungsprozesse.

Nanobiotechnologien

Nanobiotechnologie: ein aktueller Trend

Der Forschungsansatz, Nano- und Biotechnologie zu verbinden, ist relativ neu (vgl. Petschow et al. 2005). Der Begriff „Nanobiotechnologie“ ist erst 2000 im Kontext der National Nanotechnology Initiative der USA bekannt geworden. Eine einheitliche Definition von Nanobiotechnologie existiert bisher nicht und die Abgrenzungen zu anderen Disziplinen sind eher unscharf.[51]

Enge Verbindung von Nanobiotechnologie und Bionik

Weil mit Nanobiotechnologien eher wissenschaftliche Trends als abgegrenzte Forschungsgebiete gemeint sind, lassen sich keine Aussagen über den aktuellen Stellenwert der Bionik darin treffen. Es lässt sich jedoch zumindest eine deutliche Verbindung dieser Trends zu bionischen Ansätzen beobachten. Beispielsweise nehmen einige Definitionsversuche von „Nanobiotechnologie“ ausdrücklich Bezug auf die Bionik bzw. Biomimetik (bspw. Goodsell 2004). Demnach geht es in der Nanobiotechnologie um ein neues Produktionsparadigma, um die Orientierung an den „Produktionsverfahren der Natur“, insbesondere um die „Bottom-up“-Prozesse der molekularen Selbstorganisation. Mit der Entschlüsselung der organismischen Entwicklungs- und Gestaltungsmechanismen können Prozesse, wie sie in der Natur ablaufen, zumindest im Grundsatz nachgebildet werden und in der Folge ggf. als „naturgemäßere“ Technik umgesetzt werden. Hampp/Noll (2003)

51 “[W]e are now witnessing the emergence of another field in which the physical, chemical and biological sciences are converging. This field is nanotechnology. And the clearest sign that nanotechnology is emerging is that nobody can quite agree on what it is”. Editorial “Why small matters”. Nature Biotechnology 21, 1113 (2003). Weitere Ausführungen zu Definitionsschwierigkeiten von Nanobiotechnologie vgl. Petschow et al. (2005)

stellen fest „Immer detailliertere Einblicke in die molekulare Funktion biologischer Makromoleküle ließen einen neuen Zweig der Bionik entstehen, die Nanobionik.“ Hampp (2005) setzt in der Folge Nanobiotechnologien im Wesentlichen mit Bionik gleich.

Herausforderungen

Brücke zwischen belebter und unbelebter Natur

Die Nanobiotechnologie schlägt eine Brücke zwischen der unbelebten und belebten Natur und zielt darauf ab, biologische Funktionseinheiten auf molekularer Ebene zu verstehen sowie funktionale Bausteine im nanoskaligen Maßstab unter Einbeziehung technischer Materialien, Schnittstellen und Grenzflächen kontrolliert zu erzeugen.[52] Der Brückenschlag kann von zwei Richtungen aus erfolgen, von der Nanotechnologie zur Biotechnologie („Nano2Bio“) und umgekehrt („Bio2Nano“).

»Nano2Bio«

Unter „Nano2Bio“ wird die Nutzung nanotechnologischer Ansätze für die Untersuchung biologischer Fragestellungen verstanden (VDI 2002). Damit könnte sich die Nanobiotechnologie für viele (potenzielle) technische Anwendungen als notwendige Schlüsseltechnologie erweisen, bspw. für die Bereitstellung von „Bottom-up“-Produktionsverfahren (etwa um molekularelektronische Strukturen aufzubauen), von nanoskaligen neuroelektronischen Schnittstellen oder funktionalen hybriden Systemen bzw. biologischen Schichten.

Anwendungsgebiete (VDI 2002):

- Analytik und Wirkstoffforschung (in vitro): bspw. Genomik, Proteomik
- Diagnostik: Antikörper-Nachweis, Bionsensoren, Toxizitätsuntersuchungen
- Wirkstofftransport und -deposition
- biokompatible Materialien und Oberflächen

»Bio2Nano«

„Bio2Nano“ steht für bio(techno)logische Materialien und Baupläne zur Herstellung funktionaler, technischer Nanosysteme, die in den unterschiedlichsten Bereichen zum Einsatz kommen können (VDI 2002). Im pharmazeutischen Bereich, der Medizintechnik und Biotechnologie ist die Miniaturisierung ein gefragter Parameter, der möglicherweise erst durch Einbeziehung der Erfahrungen und Entwicklungen im physikalisch und chemisch dominierten Bereich der Nanotechnologie zur Entfaltung kommen kann. Als Beispiele können in diesem Zu-

52 Vgl. die Homepage des BMBF zu Nanobiotechnologien: www.nanobio.de. Ausführliche Darstellungen finden sich bspw. in VDI (2002), VDI (2004), den Publikationen von Seeman/Belcher (2002), Ball (2001), Goodsell (2004) und Jones (2004).

sammenhang die Biochip-Technologie, in vivo Früherkennungs- bzw. Behandlungsverfahren, Nanopartikel gestützte Gentherapie oder auch das „tissue engineering“ angeführt werden.

Für den Bereich „Bio2Nano“ lassen sich drei Anwendungsebenen ausmachen, die fast alle durch einen engen Bezug zu bionischen Ansätzen gekennzeichnet sind:[53] 1) die Nanofabrikation und Nanostrukturierung auf Basis biobasierter Methoden – Ziel ist die Nutzung chemisch-physikalischer Prinzipien der Selbstorganisation molekularer Einheiten zu komplexeren Gebilden; 2) die technische Nutzung funktioneller Biomoleküle bzw. Hybridsysteme – hier geht es um den Einsatz isolierter funktionaler Biomoleküle in technischen Systemen bzw. in Kombination mit nicht-biologischen Elementen; 3) die Gestaltung der Schnittstellen zwischen biologischen und technischen Systemen bzw. Materialien.

In der Summe erweisen sich vor allem die Vorstellung der „Bottom-up“-Produktionsprozesse in enger Verbindung mit den Möglichkeiten der Selbstorganisation[54] als wesentliche neue Elemente bzw. Versprechen der Nanobiotechnologien.

Konvergierende Technologien

Konvergierende Technologien: IKT, Nano- & Biotechnologien, Material- & Kognitionswissenschaften

Ähnlich wie bei Nanobiotechnologien verhält es sich mit den Konvergenztechnologien. International bekannt geworden ist der Begriff der „Konvergenztechnologien“ durch den Sammelband „Converging Technologies for Improving Human Performance“ (Roco/Bainbridge 2002), in dem die Beiträge einer von der US National Science Foundation und dem Departement of Commerce veranstalteten Konferenz im Dezember 2001 veröffentlicht wurden. Mit Konvergenz wird ein Trend beschrieben, bei dem sich Forschungsergebnisse und neue Entdeckungen bzw. Anwendungen in verschiedenen Disziplinen und Technologien gegenseitig so befruchten und ergänzen, dass damit zumindest eine neue Qualität, wenn nicht gar eine neue Disziplin oder Technologielinie entsteht. Zu den sich gegenseitig befruchtenden Disziplinen gehören die Informations- und Kommunikations- (IuK) und die Nano- und Biotechnologien sowie die Material- und die Kognitionswissenschaften. Beispielsweise ermöglicht die Entwicklung neuer Materialien, die mithilfe der Nanotechnologie hergestellt werden, die Entwicklung neuer Chips. Bionische Ansätze werden dabei ausdrücklich angesprochen, insbesondere die „Nachahmung“ der Zelle (Roco/Bainbridge 2002, S. 12) und des Wahrnehmungsapparates (*ibid.*, S. 12, 18).

53 Nicht berücksichtigt werden die nanobiotechnologischen Anwendungen im Bereich der Medizin.

54 Technischen Anwendungen der Selbstorganisation ist mittlerweile auch eine BMBF Förderaktivität gewidmet (http://www.bmbf.de/foerderungen/5150.php).

Gründe für Konvergenz

Zwei Gründe werden in der Literatur für den Trend zur Konvergenz von Nano-, Biotechnologie, IKT und Kognitionswissenschaften genannt: zum einen die Fähigkeit zur Analyse und Gestaltung auf der molekularen Ebene bzw. Nanoskala, zum anderen die Komplexität der Probleme und Anforderungen. "At the nano level genes, bits, neurons, and atoms all started looking like the same thing" schreiben die Autoren des Berichtes für das National Research Council of Canada (2003, S. 10). Daher fangen die Wissenschaftler, die bisher an Atomen, Neuronen, Bits und Genen geforscht haben, an, sich immer mehr miteinander auszutauschen. Der andere Grund liegt in der Komplexität der Sachverhalte, die Naturwissenschaftler zu lösen versuchen (Priami 2005, S. 2). Bisher versuchten die Wissenschaftler einen komplexen Sachverhalt in seine Bestandteile zu zerlegen und die Zusammenhänge zwischen den Bestandteilen zu verstehen. Priami nennt diese Herangehensweise „reduktionistisch". Die derzeitigen Herausforderungen erlauben ihm zufolge diesen Reduktionismus nicht mehr. Vielmehr bedarf es einer „systemischen" Betrachtung der Phänomene. „The basic idea is to view the systems as something that has its own behaviour not obtained simply by gluing the behaviour of the systems' components of which we already have all the information" (Priami 2005, S. 2).

Verschwimmen disziplinärer Grenzen

Die Autoren der meisten F&E-Prognosen[55] sind sich darin einig, dass sich eine Veränderung der traditionellen Forschungsweise innerhalb der Disziplinen IKT, Kognitions-, Materialwissenschaften, Nano- und Biotechnologien vollzieht. Bisher verstanden sich die einzelnen Disziplinen als etwas Eigenständiges und definierten sich über ihre jeweilige Aufgabe. Sowohl Forschung als auch Bildung waren getrennt, jede Disziplin versuchte ihre eigenen wissenschaftlichen Ziele zu verfolgen. Diese Praxis verändert sich. Forschungserfolge in bestimmten Disziplinen ermöglichen neue Entdeckungen bzw. Anwendungen in anderen Disziplinen. Die Forscher sind daher aufeinander angewiesen und müssen miteinander kooperieren: Die Grenzen der einzelnen Disziplinen verschwimmen.

Neue Möglichkeiten durch Konvergenz

Die Autoren der Technologieprognosen zu Konvergenztechnologien sehen in dieser Konvergenz neue Möglichkeiten. Sie hoffen, dass mithilfe dieser konvergierenden Forschungs- und Entwicklungsprogramme Anwendungen realisiert werden können, die auf der Basis der einzelnen Ansätze nie realisierbar wären, bspw. intelligente, selbstorganisierende biokompatible, umweltverträgliche, anpassungsfähige technische Systeme (bspw. anpassungsfähiges genetisch manipuliertes Getreide, allge-

55 Roco and Bainbridge 2001, Nordmann 2004, Roco 2005, Lieshout et al. 2005, Silberglitt et al. 2006,

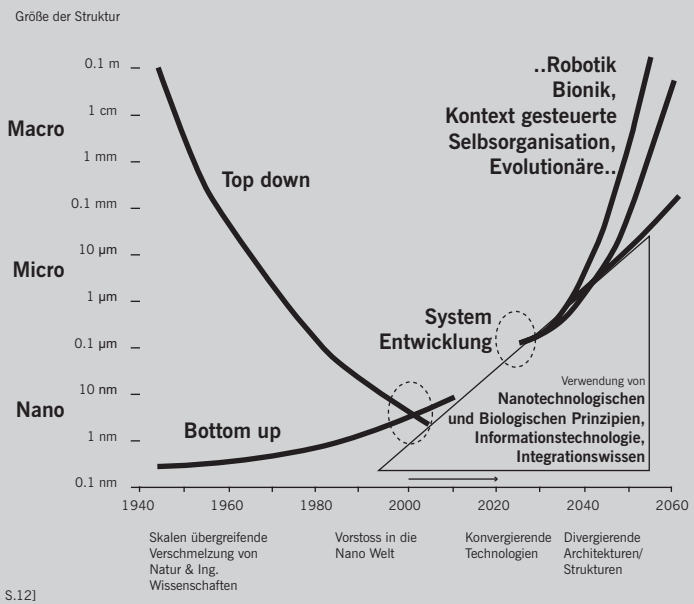
genwärtiger Informationszugang, intelligente Textilien u. v. m. (vgl. Silberglitt et al. 2006, S. 17ff)). Roco/Bainbridge (2001) gehen sogar so weit, dass sie als visionäre Ideen der Konvergenztechnologien Gehirn-zu-Gehirn Interaktion, Schlafresistenz, Vergrößerung kognitiver Fähigkeiten, Heilung mentaler Krankheiten u. ä. aufzählen (S. 18f).

Bionik als Lernfeld für Konvergierende Technologien

Die Bionik, die Materialwissenschaften und die Nanotechnologien nehmen in gewisser Weise die erwartbaren Entwicklungen der „Converging Technologies“ vorweg, indem sie ihrer Natur nach bereits das Verschmelzen, oder zumindest die sehr enge Zusammenarbeit, von Biologie, Chemie, Physik und Ingenieurwesen voraussetzen. Die aktuellen Trends in der Bionik, den Materialwissenchaften und den Nanotechnologien können somit auch als ein Lernfeld begriffen werden, auf dem wichtige und wertvolle Erfahrungen gewonnen sowie geeignete Ansätze und Konzepte im Umgang mit „Converging Technologies“ entwickelt werden können.

Roco (2005) geht darüber hinaus davon aus, dass die derzeit beobachtbare Konvergenz von Technologien ein vorübergehender Prozess ist, der seinen Höhepunkt zwischen 2000 und 2020 erreichen wird.[56]

Abbildung 3 — Entwicklung der Konvergenztechnologien



[Quelle: Roco 2005, S.12]

56 Zur bibliometrischen Überprüfung der Konvergenzhypothese vgl. Lieshout et al. 2005.

»Bottom-up«- vs. »Top-down«-Ansätze

Diese verstärkte Zusammenarbeit der Forschungs- und Technologiebereiche wird es ermöglichen, Bauprinzipien im Nanobereich zu verstehen und zu beherrschen. Dies wird dann wiederum zur Entstehung neuer Einzeldisziplinen führen, wovon die eine nach Roco Biomimetik sein wird. Die folgende Abbildung 3, die auf einer wegen ihrer hohen Anschaulichkeit schon vielfach in anderen Zusammenhängen gezeigte Graphik zur Entwicklung der „Top-down"- und „Bottom-up"-Nanotechnologien aufbaut, soll diesen Trend zur neuerlichen Differenzierung nochmals verdeutlichen. Ähnliche Tendenzen werden aber auch in anderen in die Zukunft gerichteten Arbeiten skizziert (vgl. bspw. Microsoft 2005).

Starker Einfluss der Bionik bei Konvergierenden Technologien?

Die Abbildung lehnt sich an ähnliche Graphiken des VDI an. Die Graphiken des VDI dienten zur Veranschaulichung des Trends der Nanotechnologien, der zu einer Zusammenführung einerseits der unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen als auch der „Bottom-up"- und „Top-down"-Ansätzen führte. Roco sieht in der Verschmelzung der unterschiedlichen Disziplinen den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklungsrichtung, die stark durch die Vorstellungen der Bionik/Biomimetik geprägt sind.

3.3 Biomimetik und Technomimetik – Chancen und Risiken der Konvergenztechnologien

»Self-X«-Eigenschaften als Zielattribute zukünftiger Technologien

„Smarte", „intelligente", „selbstorganisierende", „selbstheilende",[57] „fehlertolerante", „selbstreproduzierende" oder biokompatible etc. Systeme und Anwendungen kann man als Ziel der Trends und Herausforderungen aus den meisten Vertiefungsstudien herauslesen. So wollen die Sensorik-Forscher sich selbstkalibrierende, -überwachende, -optimierende Sensoren und auch biokompatible Sensoren für einen Einsatz bspw. in der Medizin entwickeln. Ziel der meisten Forschungen und Entwicklungen zur Steuerung bspw. von Robotern ist die Schaffung „intelligenter" Systeme. Zwar ist das Feld der künstlichen Intelligenz durch eine große Vielfalt der Begriffe und Konzepte geprägt (Sinčák et al. 2004). Doch allen Ansätzen, Konzepten und Modellen ist ein bionischer Ansatz inhärent, da versucht wird, das Wesen und die Funktionen biologischer Intelligenz auf technische Systeme zu übertragen. Auch in der IKT-Forschung sehen viele Wissenschaftler die zentrale Herausforderung darin, IKT-Systeme zu entwickeln, die über die „Self-X"-Eigenschaften verfügen bzw. die adaptiv im weites-

57 oder erweitert: „Self-X"-Eigenschaften

ten Sinne sind (vgl. bspw. Kephard and Chess 2003, Microsoft 2005, de Casto 2005, Müller-Schloer 2004, Enterprise Management Associates 2006). Im Bereich der Prothetik und der Gewebezüchtung liegt der Schwerpunkt der Forschung bei der Entwicklung biokompatibler Implantate. Intelligente Anwendungen spielen dort insofern eine Rolle, als dass es Versuche gibt, Chips zu entwickeln, die Gedächtnisleistungen übernehmen (Nsanze 2005) oder Gehirnsignale interpretieren können.[58] Innerhalb der Materialwissenschaften spielt der Versuch eine große Rolle, die Kenntnisse über die Selbstorganisations- bzw. Faltungsprinzipien bspw. von Peptiden und Proteinen zu nutzen, um biokompatible Materialien zu schaffen (Anderson et al. 2004). Die Forschung an „smarten" Materialien (d. h. Materialien, die ihre Eigenschaften an die Umweltanforderungen anpassen) wird in den meisten untersuchten Technologieprognosen erwähnt.[59]

In der Nanobiotechnologie geht es nicht allein um den Vorstoß in die kleinsten Dimensionen, sondern es wird zugleich eine wesentliche Orientierung vorgegeben, nämlich die Orientierung an den „Produktionsverfahren" der Natur, also insbesondere an den „Bottom-up"-Prozessen, an der molekularen Selbstorganisation etc. (Goodsell 2004). Damit verbunden sind nicht nur neue technische Möglichkeiten, sondern ganz wesentlich auch ein neues Produktionsparadigma, das sich ggf. über die Bionanotechnologien realisieren lässt.

All diesen Forschungsansätzen gemeinsam ist ein enger Bezug zu Bionik, denn die natürlichen Prozesse und Systeme verfügen über diejenigen Eigenschaften, welche von technischen Systemen zunehmend gewünscht und erwartet werden. Bogatyrev hat zur Verdeutlichung des anstehenden Paradigmenwechsels eine typisierende Darstellung eines bisher für ideal gehaltenen technischen Systems den Eigenschaften biologischer Systeme gegenüber gestellt (vgl. Tabelle 6).

»Lernen von der Natur« als Erfolg versprechender Ansatz in komplexen und dynamischen Umgebungen

Es ist insofern in bestimmten Bereichen durchaus Erfolg versprechend, von biologischen Systemen zu lernen und sie ggf. nachzuahmen. Gleichzeitig wird deutlich, dass die beschriebenen Herausforderungen nicht auf der Basis allein einer einzigen Forschungs- und Technologielinie zu meistern sind, sondern Inter-, Trans- und Multidisziplinarität essentiell erfordern. Ein Haushaltsroboter bspw., der zwar ein gefülltes Getränkeglas sicher durch verwinkelte Korridore transportieren und einer Zielperson überreichen, nicht aber Milch von Orangensaft unterscheiden kann, ist nur begrenzt einsetzbar. Ähnlich verhält es sich mit der Prothetik: Die Entwicklung von Prothesen bedarf der en-

58 www.cyberkineticsinc.com

59 Insbesondere in: Max-Planck-Gesellschaft 2001, Foresight 2000, NIMS 2005, Bensaude Vincent 2001.

Tabelle 6 — Typisierung eines idealen technischen Systems und Gegenüberstellung mit einem biologischen System nach Bogatyrev (2004)

Ideales technisches System	Biologisches System
einfache Struktur	komplexe Struktur
dauerhaft bzw. bestimmte Mindestlebenszeit	endlich (mortal)
einfach zu handhaben (Deterministisch)	schwierig zu handhaben (Stochastisch)
minimaler Verbrauch von Ressourcen	maximale Nutzung von Ressourcen
minimale Produktion von Abfall	minimale Produktion von Abfall
maximale Kapazitätsreserven	Verfügbarkeit im Überfluss
einfach zu reparieren	selbstreparierend
unterschiedliche modes für unterschiedliche Umwelten	adaptivität
automatisch	selbstregulierend
Verlässlichkeit	Verlässlichkeit

[Quelle: Bogatyrev (2004), eigene Übersetzung]

Bionik als Vorbild und Lernfeld für Konvergierende Technologien

gen Zusammenarbeit zwischen Medizinern, Materialwissenschaftler und IT-Spezialisten gleichermaßen, um biokompatible und den „natürlichen Originalen“ in ihrer Funktionsweise, Steuerbarkeit und Aktionsgeschwindigkeit in nichts nachstehende künstliche Gliedmaßen und Organe zu schaffen. In der IT- und Materialienentwicklung spielen wiederum Nanotechnologien eine zunehmend wichtige Rolle. Dies ist genau der Trend, für den Roco/Bainbridge den Ausdruck „Konvergenztechnologien“ geprägt haben (2002). Die Bionik spielt mit Blick auf die Konvergenztechnologien eine doppelte Rolle: sie ist wesentliches Element zahlreicher Lösungsansätze (vgl. Nordmann 2004, Lieshout et al. 2006, Silberglitt et al. 2006), und sie ist ebenso wie die Materialwissenschaften ein Vorbild und Übungsfeld für derartige Konvergenzen.

»Human enhancement« als Ziel Konvergierender Technologien?

Zum Teil recht heftige Kontroversen gibt es allerdings mit Blick auf die Ziele, die mit den Konvergenztechnologien verfolgt werden sollen. Roco/Bainbridge (2002) und RAND (Antón et al. 2001, Silberglitt et al. 2006) betonen, dass die Konvergenz der fünf Disziplinen uns insbesondere Möglichkeiten eröffnet, die menschlichen Fähigkeiten zu verbessern („human enhancement“) und deshalb entsprechend genutzt werden sollten. Die Autoren der EU-Studie (Nordmann 2004) sind viel vorsichtiger bzw. skeptischer hinsichtlich 1) der technischen Möglichkeiten und 2) der Wünschbarkeit ihrer Realisierung.

Die Nachahmung der Natur spielt innerhalb der Forschungsansätze, die im Rahmen der Konvergenztechnologien verfolgt werden, eine wichtige Rolle. Doch es bleibt mitunter unklar, inwieweit damit

wirklich bionische oder nur biotechnologische Forschungsansätze angesprochen werden. Am Beispiel der Spinnenseide kann dies verdeutlicht werden. Die Faszination, die von den Eigenschaften der Spinnenseide ausgeht und von der Art und Weise ihrer „Produktion" im Organismus der Spinne, wird von allen geteilt. Für die Vertreter der Bionik ist es ein Leitbild, wie eine angepasste Produktion aussehen müsste. Im Hinblick auf angemessene bionische Herstellungsverfahren für Spinnenseide können die Meinungen dagegen weit auseinander gehen. Das sehr weit reichende gentechnische Verfahren, das beispielsweise von dem Unternehmen Nexia[60] eingesetzt wird, bei dem das Gen für Spinnenseide in Ziegen eingepflanzt wird, die dann Spinnenseide in ihrer Milch produzieren sollen, gelten einigen Bionikern nicht als bionisch.[61] Wie ein bionischerer Herstellungsprozess aussehen könnte, ist allerdings noch völlig offen. Allerdings sind auch die technologischen Probleme der „harten" Verfahren keinesfalls gelöst (vgl. bspw. Dickinson 1999).

Bionik und Biotechnologie

Die Frage nach der Qualität, nach möglichen Risiken, Neben- und Folgewirkungen bestimmter Herstellungsverfahren ist keine Besonderheit des Beispiels Spinnenseide. Sie hängt eng mit den Möglichkeiten zur molekularen Gestaltung auf der Nanoskala und noch enger mit der Konvergenz zwischen Nanotechnologien und Bio- bzw. Gentechnologien zusammen. Die drastisch erhöhte Eingriffstiefe führt zu einer ebenso drastisch erhöhten Gestaltungsmacht – und diese Eingriffstiefe und Gestaltungsmacht sind nahe liegender Weise dann auch mit höheren Risikopotenzialen und weiter reichenden unerwünschten (und unerwarteten) Neben- und Folgewirkungen verbunden. Dies gilt auch für das sehr anschauliche Beispiel der Herstellung „künstlichen Perlmutts" und für andere Projekte nach dem Vorbild der Biomineralisation: Die angestrebte Herstellung von Perlmutt, von Knochen, Knorpeln und Zähnen kann höchst unterschiedlich geschehen, angefangen von einer Templat gesteuerten Kristallisation „in vitro", über ein biotechnologisches „tissue engineering" bis hin zur gentechnischen Produktion „in vivo". Das Technikbewertungskriterium der Eingriffstiefe bezieht sich auf das zur Debatte stehende Wirkpotenzial, auf die Wirkungsart, auf die Art und Weise, wie diese zustande kommt und auf seine Größenordnung. Letztere zeigt sich insbesondere in der erwartbaren Länge der jeweils ausgelösten relevanten Wirkungsketten in Raum und Zeit. Grob gesagt geht es um den Unterschied zwischen dem Einsatz eines

Eingriffstiefe und potenzielle Risiken

60 "We take a single gene from a golden orb-weaving spider and put it into a goat egg. The idea is to make the goat secrete spider silk into its milk". NYT Juni 2002.

61 Vgl. z. B. Benyus 2002. Bei der Frage, ob die Arbeitsgruppe um Thomas Scheibel an der TU München in das BioKoN-Netzwerk aufgenommen werden soll, gab es dem Vernehmen nach durchaus Kontroversen.

Eingriffstiefe und Anwendungskontexte

Baggers, eines Spatens oder eines Spatels oder um Unterschiede zwischen dem Spalten von Steinen oder Atomen. Die Wirkmächtigkeit einer Technik kann also ein Kriterium sein bei der Abschätzung erwartbarer Wirkungsdimensionen. Die Eingriffstiefe kann zusätzlich als Kriterium herangezogen werden für die Abschätzung der Wirkungsart. Es macht einen Unterschied ob ein Medikament nur an einem bestimmten Endpunkt im Körper ansetzt, oder ob es (wie bspw. Hormone) systemisch wirkt. Es macht einen Unterschied, ob ein technischer Eingriff „nur" das periphere Nervensystem oder auch das zentrale tangiert. Es macht einen Unterschied, ob naturfremde, persistente und extrem mobile FCKWs freigesetzt werden, oder Propan/Butan, das innerhalb von sieben Tagen in der Atmosphäre photochemisch abgebaut wird. Mithilfe des Technikbewertungskriteriums der Eingriffstiefe soll also unterschieden werden, wie tief in die Zielsysteme eingegriffen wird. Dabei ist auch zu beachten, wo der Eingriff ansetzt, ob an peripheren (oder redundanten) Systemelementen, oder an Basisstrukturen bzw. Steuerungsstrukturen?[62]

»Technomimetik«

Auch im Bereich der Nanobiotechnologie reichen die Ziele der Wissenschaftler weit über die Nachahmung der Natur hinaus: Die Natur dient nicht allein als Vorbild für die Technikentwicklung, sondern es erfolgt ein Dreischritt: 1) Analyse der Natur (molekulare Maschinen), 2) Analyse der technischen Anpassungsnotwendigkeiten für industrielle Prozesse, 3) Anpassung der (molekularen Maschinen der) Natur an diese produktionstechnischen Vorgaben. In diesem Sinne könnte formuliert werden, dass es im ersten Schritt um Biomimetik (Technik nach dem Vorbild der Natur) geht und im dritten Schritt um „Technomimetik" (biologische Systeme nach- bzw. umgebaut nach dem Vorbild der Technik, vgl. Petschow et al. 2005).[63]

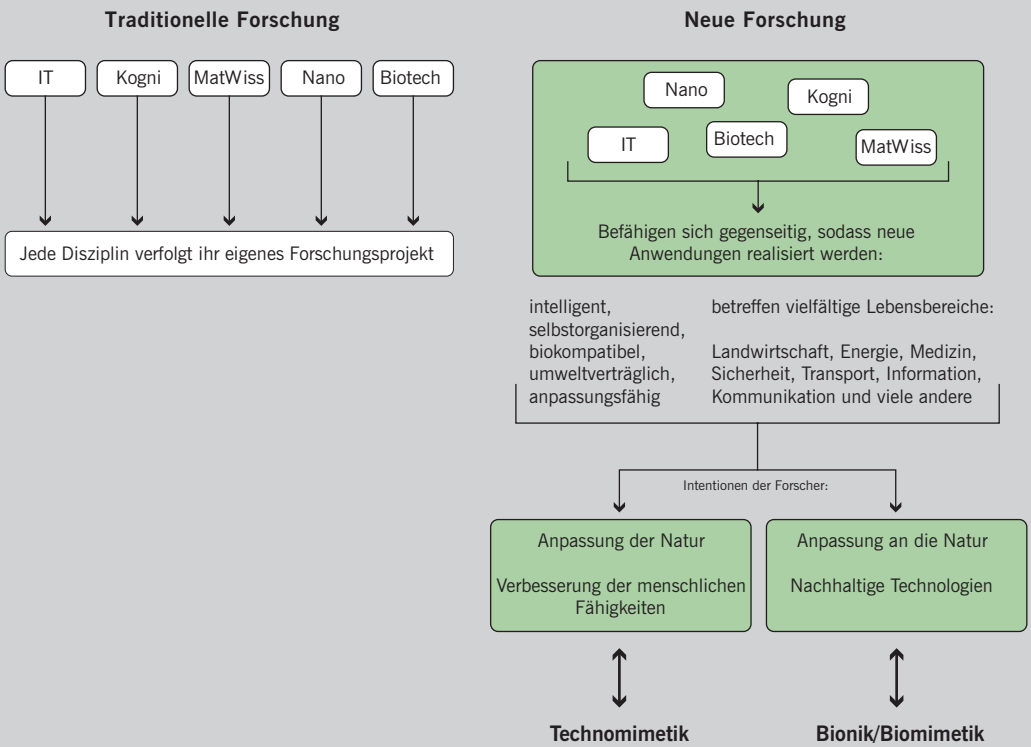
Die Abbildung 4 stellt die unterschiedlichen typisierten Herangehensweisen dar, die mit den Konvergenztechnologien verbunden sein können. Sie lassen sich allerdings nicht direkt aus den erwähnten unterschiedlichen Zugängen ableiten, welche wiederum eine Orientierung im Hinblick auf die Entwicklungsrichtung und vielleicht auch die Eingriffstiefe und Richtungssicherheit geben können. Letztendlich könnten zwei Orientierungen unterschieden werden, mit vermutlich sehr

---

62 Vgl. Petschow et. al. 2005. Zu den Hintergründen vgl. von Gleich 1989, zu Details von Gleich 1998/99. Dort findet sich ein ausgearbeitetes Methoden- und Kriterienset zur im Wesentlichen ökologisch orientierten Technik- und Stoffbewertung.

63 Ball verweist in seinem Artikel (Ball 2005) auf die unterschiedlichen Übertragungsrichtungen: „more startling, perhaps, are possibilities such as programming cells to reproduce the algorithms of cellular automata – an ironic reversal of the metaphor – so that they interact with their neighbours in titly prescribed ways, allowing them to develop spontaneous patterns, collective and multicelled behaviour, and even forms of computing" (S. R7).

Abbildung 4 — Konvergenztechnologien und Bionik



[Quelle: eigene Abbildung]

Berechtigung des Versprechens der »evolutionären Erprobtheit«

unterschiedlichen Konsequenzen hinsichtlich der jeweils damit verbundenen Anwendungsperspektiven einerseits und Risikodimensionen andererseits; auf der einen Seite die Bionik, mit den biologischen Lösungen als Vorbild und auf der anderen Seite die Technomimetik, welche die Plastizität biologischer Systeme auslotet und diese technisiert (vgl. bspw. die Ansätze der synthetischen und systemischen Biologie). Für beide Richtungen gilt, dass der Hinweis auf „evolutionäre Erprobtheit" immer weniger seine Berechtigung hat, je weiter die technische Lösung sich vom natürlichen Vorbild bzw. vom natürlichen Ausgangssystem entfernt. Auch hinsichtlich des Umgangs mit Komplexität dürften sich die beiden Entwicklungsrichtungen zunehmend annähern. Die technischen Systeme nähern sich in ihrer Komplexität der Komplexität natürlicher Systeme an und die mit deren Umbau notwendig werdende Komplexitätsreduktion der natürlichen Systeme derjenigen der techni-

schen Systeme. In beiden Fällen sind wir letztendlich praktisch mit der Problematik konfrontiert, mit komplexen, und das heißt immer auch mit nicht vollständig verstandenen Systemen umgehen zu müssen. Mit nicht vorhersehbaren Wirkungen ist demzufolge zu rechnen.

3.4 Zwischenfazit Technologische Perspektiven

Wenige explizite Erwähnungen von »Bionik« oder »Biomimetik« aber eine Vielzahl von direkten Bezügen zum »Lernen von der Natur«

„Smarte", „intelligente", „selbstorganisierende", „selbstheilende", „fehlertolerante", „selbstreproduzierende" oder biokompatible etc. Systeme und Anwendungen kann man als Ziel der Trends und Herausforderungen aus den meisten Vertiefungsstudien herauslesen. So wollen die Sensorik-Forscher sich selbstkalibrierende, -überwachende, -optimierende etc. Sensoren im Allgemeinen und auch biokompatible Sensoren für einen Einsatz in der Medizin entwickeln. Ziel der meisten Forschungen und Entwicklungen zur Steuerung von Robotern ist die Schaffung „intelligenter" Systeme. Auch in der IKT-Forschung sehen viele Wissenschaftler die zentrale Herausforderung darin, IKT-Systeme zu entwickeln, die über die „Self-X"-Eigenschaften verfügen bzw. die adaptiv im weitesten Sinne sind. Im Bereich der Prothetik und der Gewebezüchtung liegt der Schwerpunkt der Forschung bei der Entwicklung biokompatibler Implantate. Intelligente Anwendungen spielen dort insofern eine Rolle, als dass es Versuche gibt, Chips zu entwickeln, die Gedächtnisleistungen übernehmen oder Gehirnsignale interpretieren können. Innerhalb der Materialwissenschaften spielt der Versuch eine große Rolle, die Kenntnisse über die Selbstorganisations- bzw. Faltungsprinzipien bspw. von Peptiden und Proteinen zu nutzen, um biokompatible Materialien zu schaffen. Die Forschung an „smarten" Materialien (d. h. Materialien, die ihre Eigenschaften an die Umweltanforderungen anpassen) wird in den meisten untersuchten Technologieprognosen erwähnt.

Ziel: Verwirklichung von »Self-X«-Eigenschaften bei neuen Technologien

Neues Paradigma: »Bottom-up«-Produktionsprozesse

In der Nanobiotechnologie geht es nicht allein um den Vorstoß in die kleinsten Dimensionen, sondern es wird zugleich eine wesentliche Orientierung vorgegeben, nämlich die Orientierung an den „Produktionsverfahren" der Natur, also insbesondere an den „Bottom-up"-Prozessen, an der molekularen Selbstorganisation etc. Damit verbunden sind nicht nur neue technische Möglichkeiten, sondern ganz wesentlich auch ein neues Produktionsparadigma, das sich ggf. über die Bionanotechnologien realisieren lässt. Es geht darum Formen und Strukturen (u. a. über molekulare Selbstorganisation) „Wachsen zu lassen" statt sie aus einem Block herauszumeißeln oder das Material zu homogenisieren und dann in Form zu gießen oder zu pressen.

Bionik als Vorbild und Übungsfeld für Konvergierende Technologien

Gleichzeitig wird deutlich, dass die beschriebenen Herausforderungen nicht auf der Basis allein einer einzigen Forschungs- und Technologielinie zu meistern sind, sondern Inter-, Trans- und Multidisziplinarität essentiell erfordern. Die Bionik spielt mit Blick auf die Konvergenztechnologien eine doppelte Rolle: sie ist wesentliches Element zahlreicher Lösungsansätze, und sie ist ebenso wie die Materialwissenschaften und die Nanotechnologien ein Vorbild und Übungsfeld für derartige Konvergenzen.

4 THEMEN, AKTEURE UND NETZWERKE – ERGEBNISSE DER LITERATUR- UND PATENTANALYSEN

4.1 Nationale F&E-Landschaft der Bionik
4.2 Die Netzwerke »BioKoN« und »Kompetenznetz Biomimetik«
4.3 GTBB, Konferenzen und Experteninterviews
4.4 Vernetzungsaktivitäten und -intensitäten zwischen den Akteuren
4.5 Analyse und Beschreibung der deutschen F&E-Landschaft durch Literaturrecherchen
4.6 Internationale F&E-Landschaft
4.7 Bionik in Bildung und Ausbildung
4.8 Zwischenfazit zu Themen, Akteuren und Netzwerken

»Mir kommen die Wege, auf denen die Menschen zur Erkenntnis gelangen fast ebenso bewunderungswürdig vor, wie die Natur der Dinge selbst.«

JOHANNES KEPLER, 1571–1630

4 THEMEN, AKTEURE UND NETZWERKE – ERGEBNISSE DER LITERATUR- UND PATENTANALYSEN

4.1 Nationale F&E-Landschaft der Bionik

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der wichtigsten Ergebnisse zu den Untersuchungen der deutschen Forschungs- und Entwicklungslandschaft im Hinblick auf Bionik. Die Ergebnisse einer Netzwerkanalyse werden dabei ergänzt durch die Ergebnisse von Datenbankanalysen zu Veröffentlichungen und Zitationshäufigkeiten. Entsprechend den Erkenntnissen, welche aus den Technologieprognosen und den Kurzfallstudien gewonnen werden konnten (vgl. Kapitel 3.2), ist sowohl bei der Analyse als auch der folgenden Darstellung der „Forschungs- und Entwicklungslandschaft Bionik“ hinsichtlich zweier Kategorien unterschieden worden: 1) „Bionik im engen Sinne“ und 2) F&E-Ansätze, denen das „Lernen von der Natur“ zugrunde liegt.

› s. Kapitel 3.2

»Bionik im engen Sinne«

Es sind also zum einen diejenigen Akteure und Institutionen untersucht worden, die sich explizit zu bionischer Forschung und Entwicklung (F&E) bekennen, d. h., die „Bionik im engen Sinne“ betreiben. Inhaltlich sind diese F&E-Aktivitäten hauptsächlich dem ersten (Funktionsmorphologie) und zweiten (Signal- und Informationsverarbeitung) Entwicklungsstrang der Bionik (siehe Kapitel 2) verhaftet; auch bewegt sich die „Bionik im engen Sinne“ eher auf der ersten (von den Ergebnissen der Evolution) und zweiten (vom Evolutionsprozess selbst) Ebene des Lernens von der Natur (siehe ebenfalls Kapitel 2).

› s. Kapitel 2

»Lernen von der Natur«

Zum anderen wurden aber auch jene Akteure und Institutionen analysiert, deren F&E-Ansätze einen deutlichen Bezug zum „Lernen von der Natur“ für technische Lösungsmöglichkeiten beinhalten. In der Mehrzahl der Fälle sind die F&E-Aktivitäten dieser Kategorie hauptsächlich dem zweiten und dritten Entwicklungsstrang (Molekulare Selbstorganisation und Nanotechnologie) zuzuordnen. Ein „Lernen von den (Erfolgs-)Prinzipien der Natur“ (dritte Ebene) (vgl. Kapitel 2) ist hier stärker verbreitet als bei der „Bionik im engen Sinne“. Die zweite Kategorie „Lernen von der Natur“ deckt dabei auch eine große Zahl derjenigen „bionischen“ Ansätze ab, bei denen die Verschmelzung der drei Entwicklungsstränge der Bionik am weitesten vorangeschritten ist und ein paralleles Lernen von der Natur auf allen drei Ebenen (Ergebnisse der Evolution, Evolutionsprozess und Erfolgsprinzipien) stattfindet. Die Nähe zu den „converging technologies“ ist hier also bereits deutlich erkennbar.

› s. Kapitel 2

Analyse von Bionik-Netzwerken & -Institutionen

Einen ersten Zugang zur deutschen Bioniklandschaft bietet die Analyse der institutionalisierten Netzwerke „BioKoN“ und „Kompetenznetz (KN) Biomimetik“, die nach eigenem Bekunden „die wichtigsten Arbeitsgruppen im Bereich Bionik umfassen“ (BioKoN)[64] und eine „Schnittstelle zwischen [universitärer] Forschung und industrieller Anwendung“ (KN Biomimetik)[65] darstellen. Schon vor den beiden Netzwerken gab es die 1990 gegründete „Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik“ (GTBB).[66] Die Analyse der Mitgliedsstrukturen sowie der Teilnahme und der Beiträge zu Konferenzen wurden durch ausgewählte Interviews ergänzt,[67] in denen auch gezielt die Intensität der Kontakte und Aktivitäten erfragt wurde. Auf diese Weise konnten insbesondere die Akteure und Institutionen, die Bionik im engen Sinne (siehe oben) betreiben, identifiziert und analysiert werden.

Interviews

Literatur- und Patentanalysen

Einen zweiten Zugang stellte die Recherche in Literatur- und Zeitschriftenartikel-Datenbanken dar, in denen gezielt sowohl nach den Begriffen „Bionik“ und „Biomimetik“ (und deren englischen Entsprechungen) als auch nach solchen Begriffen gesucht wurde, die häufig für die Beschreibung von Ansätzen und Konzepten gebraucht werden, die ein „Lernen von der Natur“ entweder klar voraussetzen oder zumindest nahe legen (bspw. „Selbstorganisation“/„-heilung“). Auf diese Weise konnten auch und insbesondere solche Akteure und Institutionen identifiziert werden, die nicht „Bionik im engen Sinne“ betreiben, deren F&E-Aktivitäten aber dennoch einen klaren Bezug zum „Lernen von der Natur“ erkennen lassen.

4.2 Die Netzwerke »BioKoN« und »Kompetenznetz Biomimetik«

»Bionik-Kompetenz-Netz« (BioKoN)

Im Unterschied zur Mitgliedschaft in der GTBB muss die Aufnahme in die beiden Netzwerke beantragt werden. Im Zuge des Aufnahmeverfahrens kann insofern im Falle der institutionalisierten Bionik-Netzwerke von einer gewissen Form der Qualitätssicherung gesprochen werden. Das „Bionik-Kompetenz-Netz“ (BioKoN) wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts im Jahr 2001 gegründet und befindet sich seit 2004 (zweite Projektphase) in Trägerschaft des gleichnamigen eingetrage-

64 siehe Selbstdarstellung unter: http://www.biokon.net/biokon/biokon.html (Zugriff: Januar 2007).

65 siehe Selbstdarstellung unter: http://www.biologie.uni-freiburg.de/biomimetik/index.html (Zugriff: Januar 2007)

66 Siehe Selbstdarstellung unter: http://www.gtbb.org/ (Zugriff: Januar 2007).

67 Die Interviewpartner sind im Anhang aufgelistet (Tabelle 18). Weierhin basieren Aussagen des Abschnitts auf infromellen Gesprächen, die auf Workshops im Rahmen dieser Studie stattfanden. Die Teilnehmerliste ist ebenfalls im Anhang (Tabelle 17)

Tabelle 7 — Hochschulen in den Netzwerken BioKoN und Kompetenznetz Biomimetik

Nr.	Hochschule	Institution/Abteilung	Personen (Leitung)
1	RWTH Aachen	Bionik Zentrum Aachen (bündelt Lehre und Forschung an der RWTH Aachen und ist am Institut für Biologie II angesiedelt)	PD Dr. H. Luksch (Geschäftsführer)
2	Technische Universität Berlin	Lehrstuhl Bionik und Evolutionsstrategie	Prof. emerit. Dr. I. Rechenberg (ehemaliger Leiter des LS)
3	Universität Bielefeld	Arbeitsgruppe Biologische Kybernetik/ Theoretische Biologie (an der Fakultät für Biologie)	Prof. Dr. H. Cruse (Leiter der AG)
4	Universität Bochum	Arbeitsgruppe Sensorische und kognitive Ökologie mariner Säuger am Lehrstuhl für Allgemeine Zoologie und Neurobiologie (Fakultät für Biologie)	PD Dr. G. Dehnhardt (Leiter der AG)
5	Universität Bonn	Arbeitsgruppe Bionik am Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen; Abteilung Neuroethologie und sensorische Ökologie und Abteilung Vergleichende Neurobiologie (beide am Institut für Zoologie)	Prof. Dr. W. Barthlott, Prof. Dr. G. von der Emde, Prof. Dr. H. Bleckmann (jeweils Leiter der AG/Abteilungen)
6	Hochschule Bremen	Fachrichtung Bionik am Fachbereich Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissenschaften; Bionik-Innovations-Cenrum (BIC)	Prof. Dr. A. Kesel (Leiterin)
7	Technische Universität Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt, BitZ (struktureller Rahmen des Forschungs-schwerpunkts Biotechnik an der TU Darmstadt)	Prof. Dr. C. Tropea (Sprecher), Dr. H. Bargel (Geschäftsführung)
8	Technische Universität Dresden	Lehrstuhl für Botanik (am Institut für Botanik)	Prof. Dr. C. Neinhuis (Leiter)
9	Universität Freiburg	Plant Biomechanics Group des Botanischen Gartens der Universität Freiburg	Prof. Dr. T. Speck (Leiter)
10	Universität Göttingen	Institut für Forstzoologie und Waldschutz (an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie)	Prof. Dr. S. Schütz (Leiter)
11	Technische Universität Ilmenau	Fachgebiet Biomechatronik (an der Fakultät für Maschinenbau)	Prof. Dr. H. Witte (Leiter)

Forschungen	Lehre	Netzwerk
in vielen verschiedenen Bereichen an 20 Instituten (insgesamt 6 Fakultäten)	Lehrveranstaltung	BioKoN
in verschiedenen Bereichen, insb. Strömungsoptimierung, Evolutionsstrategie, Robotik und Energiegewinnung	Lehrveranstaltungen (Vorlesungen, Seminare, Praktika)	BioKoN
in den Bereichen Robotik (Sensorik, Aktorik, Steuerung)	Lehrveranstaltung	BioKoN
zu Orientierungsmechanismen mariner Säugetiere	nicht bekannt	BioKoN
in den Bereichen Oberflächen (Pflanzen) und Strömungs-/Elektro-/Infrarotsensoren (Tiere)	Lehrveranstaltungen	BioKoN
in vielen Bereichen, insb. Schiffbau/ Meerestechnik	Internationaler Studiengang Bionik (ISB)	BioKoN
in vielen verschiedenen Bereichen (insgesamt 30 Hochschulprofessoren/-innen	Interdisziplinärer Studien-schwerpunkt Biotechnik	BioKoN
zu Ober-/Grenzflächen von Pflanzen	Lehrveranstaltungen	BioKoN
in verschiedenen Bereichen mit Bezug zu Pflanzen (Werkstoffentwicklung)	Universitäres Forschungsprojekt	BioKoN/KN Biomimetik
im Bereich Sensorik von Insekten	nicht bekannt	BioKoN
in den Bereichen Mikrosysteme, Medizintechnik und Robotik	Studienschwerpunkt Biomechatronik	BioKoN

→ Fortsetzung nächste Seite

Nr.	Hochschule	Institution/Abteilung	Personen (Leitung)
12	Fachhochschule Köln	Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik	C. Hacker (Lehrbeauftragter)
13	Hochschule Magdeburg-Stendal	Industrial Design Institut (am Fachbereich Design)	Prof. Dr. U. Wohlgemuth (Leiter)
14	Hochschule Mannheim	Institut für Konstruktionslehre/CAD und Institut für biologische Verfahrenstechnik (beide an der Fakultät Verfahrens- und Chemietechnik)	Prof. Dr. K. Peschges; Prof. Dr. P. M. Kunz (jeweils Leiter)
15	Technische Universität München	Fiberlab (am Lehrstuhl für Biotechnologie im Bereich Organische Chemie und Biochemie)	Dr. T. Scheibel (Laborleiter)
16	Universität Münster	Institut für Technik und ihre Didaktik (am Fachbereich Physik)	Prof. Dr. B. Hill (Leiter)
17	Hochschule Saarbrücken	Institut für Produktentwicklung und -optimierung, InPEO (Zusammenschluss mehrerer Professoren und Labore der HTW Saarbrücken); Fachbereich Architektur	Prof. Dr. H.-J. Weber (Ansprechpartner InPEO); Prof. Dr. G. Pohl (FB Architektur)
18	Universität des Saarlandes	BioKoN-Standort Saarbrücken (Büro und Koordinierung des BioKoN-Standorts)	Prof. emerit. Dr. Nachtigall
19	Universität Tübingen	Projektgruppe Funktionelle Morphologie und Biomimetik (am Institut für Geowissenschaften); Abteilung Evolutionsbiologie der Invertebraten (am Institut für Zoologie)	Prof. Dr. V. Mosbrugger (ehemaliger Leiter der Projektgruppe); Prof. Dr. O. Betz (Leiter der Abteilung)
20	Universität Ulm	BioFuture Research Group (bei der Abteilung Neurobiologie)	Dr. F.-O. Lehmann (Leiter)

nen Vereins. Ziel des „BioKoN“ ist, „die Potenziale der Bionik der Industrie und Wissenschaft aufzuzeigen und weiter auszuschöpfen“ sowie „eine tragfähige und dauerhafte Infrastruktur für die Bionik“[68] in Deutschland zu schaffen. Das „BioKoN“ deckt in insgesamt vier ständigen sowie sieben thematischen Fachgruppen ein großes Spektrum der Bionik (vor allem der Bionik im engen Sinne) ab.

»Kompetenznetz Biomimetik« (KN-Biomimetik)

Das Kompetenznetz „Pflanzen als Ideengeber für die Entwicklung biomimetischer Materialien und Technologien“ (Kompetenznetz Biomimetik) ist ein Zusammenschluss von Bionikern an den Universitäten Freiburg und Tübingen und dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf.[69] Es wurde 2002 gegründet und wird seitdem vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg gefördert. Im Unterschied zum

Forschungen	Lehre	Netzwerk
nicht bekannt	nicht bekannt	BioKoN
im Bereich Bionik-Design	Lehrveranstaltung	BioKoN
nicht bekannt	nicht bekannt	BioKoN
zu biologischen Fasern, insbesondere Spinnenseide	nicht bekannt	BioKoN
Bionik in der Schuldidaktik (Lehramtsausbildung)	Lehrveranstaltungen	BioKoN
in verschiedenen Bereichen, insbesondere der Bau- und Konstruktionsbionik	nicht bekannt	BioKoN
nicht bekannt	nicht bekannt	BioKoN
Projektgruppe: Wassertransport in Pflanzen; Abteilung: nicht bekannt	nicht bekannt	BioKoN/KN Biomimetik
zum Insektenflug	nicht bekannt	BioKoN

„BioKoN“ ist es sowohl thematisch enger als auch organisatorisch sehr viel kleiner.[70]

Ergebnisse der Netzwerkanalysen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Recherchen auf den Internetseiten der beiden Bionik-Netzwerke[71] tabellarisch zusammengefasst. Dabei erfolgt die Darstellung jeweils getrennt nach Hochschulen (Tabelle 7), außeruniversitären F&E-Einrichtungen (Tabelle 8) und Unternehmen (Tabelle 9). Es wurden zunächst nur diejenigen Einrichtungen und Personen aufgenommen, die explizit als Mitglieder/Kooperationspartner in den Netzwerken genannt worden sind. Insgesamt konnten

69 Siehe die Internetseiten des KN Biomimetik unter: http://www.biologie.uni-freiburg.de/biomimetik/index.html (Zugriff: Januar 2007)

70 Es ist selbst Mitglied im „BioKoN“

71 BioKoN: http://www.biokon.net/index.shtml /Kompetenznetz Biomimetik: http://www.biologie.uni-freiburg.de/biomimetik/ .

so 20 Hochschulen, und je neun außeruniversitäre F&E-Einrichtungen und Unternehmen identifiziert werden. Damit wird deutlich, dass beide Netzwerke (noch) sehr stark von Hochschulen geprägt werden und Partner aus der Wirtschaft zumindest nicht als Mitglieder bzw. Kooperationspartner direkt in Erscheinung treten.

Hochschulen in BioKoN und KN-Biomimetik

Die Quantität und Intensität der Bionik-Aktivitäten an diesen 20 Hochschulen (Tabelle 7) lässt sich je zur Hälfte grob nach zwei Kategorien[72] ordnen. Zum einen gibt es Standorte bei denen die Bionik durchaus auch in der Außenkommunikation eine Rolle spielt wie bspw. die TU Darmstadt, die seit 2003 über ein eigenes „Biotechnik-Zentrum" (BitZ) verfügt, die TU Berlin, an welcher seit 1972 das Fachgebiet „Bionik und Evolutionsstrategie" existiert, oder die Hochschule Bremen mit ihrem „Bionik-Innovations-Centrum" (BIC) (seit 2004) und dem weltweit ersten und bisher einzigen grundständigen Studiengang „Bionik" (seit 2003). In diesen Zentren sind verschiedene Akteure aus unterschiedlichen (Fach-)Bereichen über einen längeren Zeitraum mit Forschung und Lehre zur Bionik befasst. Zu dieser Kategorie der fachlich, personell und strukturell im Bereich Bionik relativ breit aufgestellten Hochschulen lassen sich, neben den bereits genannten, jeweils mit Einschränkungen noch die Universität Freiburg („KN Biomimetik"), die Universität Bonn (Nees-Institut, Lotuseffekt), die TU Ilmenau (Biomechatronik) sowie die RWTH Aachen („Bionik-Zentrum Aachen") zuordnen.

Daneben gibt es eine zweite Gruppe von Hochschulen, an welchen Bionik meist nur an einem (oder Teilen eines) Fachbereich(s)/Lehrstuhl(s) von nur wenigen Personen betrieben wird. Zu dieser Kategorie zählen die Universität Bielefeld (Robotik), die Universität Bochum (Orientierungsmechanismen mariner Säugetiere), die TU Dresden (pflanzliche Ober-/Grenzflächen), die Universität Göttingen (Sinnesorgane der Insekten), die Hochschule Magedeburg-Stendal (Design) und die Universität Münster (Didaktik). Mit weiteren Einschränkungen können auch noch die Hochschule Mannheim, die TU München, die Fachhochschule Köln, die Universität Tübingen[73] und die Universität Ulm hier zugeordnet werden.

Zu erwähnen ist noch die Universität des Saarlandes (Saarbrücken), an der Prof. Nachtigall seit 1969 den Lehrstuhl für Zoologie inne hatte. Er und seine Gruppe beschäftigten sich bereits sehr früh mit Bionik

72 Auch innerhalb der im Folgenden beschriebenen zwei Kategorien gibt es z.T. deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Hochschulen. Nichtsdestotrotz macht die Unterteilung in zwei Kategorien Sinn, da so die Grundtendenzen sichtbar werden.

73 Die Universität Tübingen in dieser Kategorie zu finden ist überraschend, weil sie durch Prof. Mosbrugger und Frau Dr. Roth-Nebelsick im „KN Biomimetik" vertreten ist. Allerdings ist Prof. Mosbrugger 2005 an das Senkenberg-Institut in Frankfurt/M. gewechselt.

und gründeten im Jahre 1990 sowohl die Studienrichtung „Technische Biologie und Bionik", deren Leiter er bis zu seiner Erimitierung im Jahre 2002 war, als auch die schon erwähnte „Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik" (GTBB). Von Saarbrücken ging auch die Initiative für die alle zwei Jahre stattfindenden Bionikkonferenzen aus, die wesentlich waren für die Herausbildung der Identität dieser Forschungs- und Entwicklungsrichtung.[74] Prof. Nachtigall und der von Prof. Hertel (Flugzeugbau) beeinflusste Prof. Rechenberg (Lehrstuhl „Bionik und Evolutionsstrategie" der TU Berlin: gegründet 1972) bestimmten – nicht zuletzt auch mit ihren Veröffentlichungen und Lehrbüchern – (neben Prof. Dr. Mattheck, Prof. Heydemann und später Prof. Barthlott) über viele Jahre das Erscheinungsbild der deutschen Bionik-Community (bezüglich Bionik im engen Sinne). Inzwischen ist zwar auch schon eine etwas breiter aufgestellte „zweite Generation" von Bionikern aktiv und viele davon in „Amt und Würden" (Bannasch, Cruse, Kesel, Speck, Mosbrugger, Neinhuis, Tropea, Witte), trotzdem ist es bemerkenswert, dass die Universität Saarbrücken mit der Erimitierung von Prof. Nachtigall fast alle Bionik-Aktivitäten einstellte. Auch die Wiederbesetzung des Lehrstuhl von Rechenberg an der TU Berlin verzögert sich derzeit.[75]

»Die Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik« (GTBB)

In die Tabelle 8 wurden nun diejenigen im BioKoN oder KN Biomimetik registrierten F&E-Einrichtungen aufgenommen, die außerhalb von Hochschulen angesiedelt sind und öffentlich (grund-)finanziert werden oder gemeinnützig arbeiten (bspw. eingetragene Vereine).[76] Ein dritte Gruppe von Einrichtungen, die Forschung und Entwicklung betreiben und als GmbH oder in vergleichbaren Rechtsformen organisiert sind, wurden den Unternehmen zugeordnet und in Tabelle 9 gelistet. Die Verteilung auf diese Tabellen verdeutlicht einmal mehr, dass die Bionik in Deutschland eher von den Forschungsgruppen getrieben wird („technology push") und weniger von der Nachfragen gezogen („demand pull"). Die beiden Bionik-Netzwerke werden von öffentlichen bzw. gemeinnützigen Einrichtungen dominiert. Die Wirtschaft ist nur schwach vertreten.

Außeruniversitäre F&E-Einrichtungen im BioKoN und KN-Biomimetik

Auch bei den außeruniversitären F&E-Einrichtungen reicht die Intensität der Bionikaktivitäten von eigenen Abteilungen oder Forschungsgruppen (bspw. „Forschungsgruppe Bionik" am ITV Den-

74 Internetseiten des BioKoN-Standorts Saarbrücken: http://www.uni-saarland.de/fak8/bi13wn/index.html (Zugriff: Januar 2007).

75 Wie es heißt können sich die Fachgebiete nicht darüber einigen, wo die Nachfolge letztlich angesiedelt werden soll. Dies wäre allerdings ein nicht untypisches Problem angesichts interdisziplinär arbeitender Forschungsgebiete.

76 Die Fraunhofer Institute sind allerdings mit ihrer geringen Grundfinanzierung und hohen Industriebeteiligung ebenso wie das ITV Denkendorf nicht gleichermaßen berechtigt eingeordnet.

Tabelle 8 — Außeruniversitäre öffentliche oder gemeinnützige F&E-Einrichtungen in den Netzwerken BioKoN und Kompetenznetz Biomimetik

Nr.	Institution	Abteilung(en)	Personen (Leitung)	Netzwerk
1	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung Bremerhaven	Biological Oceanography; Plancton Biomechanics;	Dr. Markus Geisen; Dr. Christian Hamm; Dr. Christof Baum	BioKoN
2	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,	Abteilung Biomechanik am Institut für Materialforschung II	Prof. Dr. Claus Mattheck; Dr. Iwiza Tesari; Roland Kappel	BioKoN
3	Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, IFAM Bremen	Bereich Biopolymere in der Abteilung Klebtechnik und Oberflächen	Dr. Klaus Rischka; Dr. Volkmar Stenzel, Dr. Ingo Grunwald	BioKoN
4	Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Fabrikautomatisierung (IFF) Magdeburg	Robotersysteme	Dr. Norbert Elkmann; Dr. Oliver Lange	BioKoN
5	Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT Oberhausen	Geschäftsfeld Spezialwerkstoffe	Jürgen Bertling; Marcus Rechberger	BioKoN
6	Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. (GfaI), Berlin	Bereich Signalverarbeitung	Dr. Ralf Schröder; Dr. Olaf Jaeckel	BioKoN
7	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf	Forschungsgruppe Bionik	Prof. Dr. Heinrich Planck; Dr. Thomas Stegmaier; Dr. Markus Milwich	BioKoN/KN Biomimetik
8	Max-Planck-Institut für Metallforschung Stuttgart	Forschungsgruppe Evolutionäre Biomaterialien	Dr. Stanislav Gorb; Dr. Dagmar Voigt	BioKoN
9	Institut für Technik und Design e. V., ITD Ingolstadt	nicht bekannt	Prof. Dr. Jörg Wellnitz; Michael Hartmann	BioKoN

kendorf, „Forschungsgruppe Evolutionäre Biomaterialien“ am MPI für Metallforschung, oder „Abteilung Biomechanik“ des Instituts für Materialforschung II am FZK) bis zu nur vereinzelten Aktivitäten (bspw. Institut für Technik und Design oder Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Fabrikautomatisierung). Es sollte aber auch hier bereits erwähnt werden, dass am Max-Planck-Institut für Kolloid und Grenzflächenforschung in Golm mindestens ebenso intensive bioni-

Tabelle 9 — Unternehmen im Netzwerk BioKoN

Nr.	Unternehmen	Tätigkeitsfeld	Personen (Leitung)
1	EvoLogics GmbH, Berlin	zahlreiche F&E-Aktivitäten im Bereich Bionik, Unterwasserkommunikation, Strömungsbeeinflussung, Finray	Dr. Rudolf Bannasch, Dr. Konstantyn Kebkal
2	inpro – Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Berlin	F&E-Transfer im Bereich Automobilproduktion	Dr. Michael Herdy
3	Dr. Brand Research & Consult, Berlin	nicht bekannt	Prof. Dr. Frank Brand
4	Architekturbüro Oligmüller, Bochum	Entwurf und Gestaltung von Gebäuden	Dieter Oligmüller
5	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) GmbH, Kaiserslautern/ Saarbrücken/Bremen	F&E-Aktivitäten im Bereich Robotik (Forschungsgruppe Robotik)	Prof. Dr. Frank Kirchner; Dr. Dirk Spenneberg; Jan Albiez
6	Bionic StreamForm, Saarbrücken	Prototypen- und Modellanfertigung für F&E-Zwecke	Frank Wedekind
7	Dr. Mirtsch GmbH, Teltow	Herstellung von wölbstrukturierten Blechen	Dr. Mirtsch
8	Suntec-Orga GmbH, Velten	Herstellung und Vertrieb einer thermischen Solaranlage	Helmut Juran
9	Brodbeck Medienproduktion, München	Produktion von Medienbeiträgen über Bionik	Thomas Brodbeck

sche Forschung betrieben wird wie am MPI in Stuttgart. Es gibt auch deutliche Hinweise dafür, dass sich das MPI Golm stärker auf das BioKoN-Netzwerk zu bewegt.

Unternehmen im BioKoN und KN-Biomimetik

In Tabelle 9 sind schließlich die im BioKoN als Mitglieder gelisteten Unternehmen aufgeführt.[77] Zwei Drittel der genannten Unternehmen sind Klein-/Kleinstunternehmen, bei den restlichen handelt es sich um (eher kleine) mittelständische Unternehmen. Zum Teil beschäftigen sich nur einige wenige MitarbeiterInnen mit Bionik (inpro). Über eine Zusammenarbeit mit Unternehmen außerhalb der Netzwerke ist damit natürlich noch nichts ausgesagt.

77 Das „KN Biomimetik“ führt keine Unternehmen als Mitglieder.

4.3 GTBB, Konferenzen und Experteninterviews

Der weite Kreis von Bionik-Akteuren

In den folgenden Tabellen (Tabelle 10 bis Tabelle 12) sind die Ergebnisse der Auswertung der Mitgliedschaften in der „Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik e. V.“ (GTBB), der analysierten Konferenzen und der durchgeführten Experteninterviews zusammengefasst.

In der Tabelle 10 finden sich mit insgesamt ca. 60 Einträgen dreimal so viele Hochschulen mit Bionik-Bezug im Vergleich zur Analyse der beiden Netzwerke (siehe oben). Allerdings sind die meisten der gelisteten Hochschulen nicht dauerhaft im Bereich der Bionik-F&E aktiv. An manchen Hochschulen konnte nur ein einziges Projekt mit Bezug zur Bionik identifiziert werden.[78]

Dass Forscher(-gruppen) an Hochschulen in Tabelle 10, nicht jedoch in Tabelle 7 aufgelistet sind, kann zwei verschiedene Gründe haben. Zum einen – und das dürfte für die meisten Fälle gelten – wird zumindest bisher an diesen Hochschulen nicht kontinuierlich Bionik betrieben. Das heißt, „BioKoN“ und „KN Biomimetik“ decken – zumindest *qualitativ* gesehen – diejenigen Hochschulen recht gut ab, die explizit und über Einzelprojekte hinausgehend Bionik-Forschung und -Lehre durchführen.

Identifikation von Bionik-Akteuren

Nichtsdestotrotz gibt es aber auch Forscher(-gruppen) an Hochschulen, die durchaus kontinuierlich mit bionischen Ansätzen (nach dem Vorbild der Natur) forschen, aber dennoch nicht Mitglieder in den beiden Netzwerken sind. Zwei Beispiele sollen hier kurz erwähnt werden. Der Lehrstuhl für Biomimetische und bioanorganische Chemie von Prof. Dr. Dirk Volkmer an der Universität Ulm formuliert als Kernaufgabe und -inhalt seiner Arbeit die „biomimetische Katalyse und bio-inspirierte Materialsynthese“.[79] Die Universität Ulm ist zwar mit der Gruppe von Prof. Dr. Fritz-Olaf Lehmann am Institut für Neurobiologie der Universität Ulm, die sich mit dem Flug von Insekten als Ausgangspunkt für technische Umsetzungen beschäftigt, Mitglied im „BioKoN“ und daher auch in Tabelle 7 vertreten. Volkmers Gruppe (an derselben Universität), die sich auf molekularbiologischer bzw. -chemischer Ebene mit der Übertragung biologischer

78 Bei einigen wenigen Hochschulen blieb trotz Nachfrage unklar, welche Aktivitäten dort im Bereich Bionik durchgeführt werden oder wurden. Dennoch sind auch diese Hochschulen in die Tabelle aufgenommen worden, da sie von einer der beschriebenen Quellen benannt worden sind. Eine detaillierte und tiefgehende Analyse, d. h. umfassende Auswertung der einzelnen Forschungs- und Lehraktivitäten und Gespräche mit Hochschulprofessoren/-innen aller der fast 60 Hochschulen konnte im Rahmen des Projekts nicht geleistet werden.

79 Internetseite des Lehrstuhls für Biomimetische und bioanorganische Chemie: http://www.uni-ulm.de/ac2/Volkmer_Group/ (Zugriff: Januar 2007).

Tabelle 10 — Hochschulen in Deutschland mit bionischen Aktivitäten

Nr.	Hochschule	Institution/Abteilung	Personen (Leitung)
1	FH Aachen	FB Luft- und Raumfahrttechnik	Prof. Dr.-Ing. Mertens
2	RWTH Aachen	Bionik Zentrum Aachen	PD Dr. H. Luksch (Geschäftsführer)
3	FH Aalen	Europäisches Kompetenzzentrum Metallguss Fachhochschule Aalen	Prof. Dr. Klein; Prof. Dr. Waidmann
4	Universität Augsburg	Lehrstuhl Systemnahe Informatik und Kommunikationssysteme	Prof. Dr. Ungerer
5	FU Berlin	FB Mathematik und Informatik; Institut für Neurobiologie	Prof. Dr. Raul Rojas; Prof. Dr.Menzel
6	HU Berlin, Charité, Universitätsmedizin Berlin	Labor für Biofluidmechanik; Klinik für Allgemein-, Visceral- und Transplantation schirurgie	Dr.-Ing. Ulrich Kertzscher; Prof. Dr.-Ing. Klaus Affeld; Dr. med. Sauer
7	TU Berlin	Lehrstuhl Bionik und Evolutionsstrategie	Prof. emerit. Dr. I. Rechenberg
8	Universität Bielefeld	Lehrstuhl Biologische Kybernetik/ Theoretische Biologie	Prof. Dr. H. Cruse
9	Universität Bochum	Forschungsgruppe Biomechanische Konstruktionen; AG Photobiotechnologie; Institut für Neuroinformatik; AG Sensorische und kognitive Ökologie mariner Säuger	Dr.-Ing. Witzel; Prof. Dr. T. Happe; Dr. C. Igel; Prof. Dr. G. Dehnhardt
10	Universität Bonn	Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen; Neuroethologie und sensorische Ökologie; Vergleichende Neurobiologie,	Prof. Dr. W. Barthlott; Prof. Dr. von der Emde; Prof. Dr. Bleckmann; PD Dr. Schmitz
11	Hochschule Bremen	Fachrichtung Bionik	Prof. Dr. A. Kesel; Prof. Dr. Susanna Labisch; Prof Dr.-Ing. Jörg Müssig
12	Hochschule für Künste Bremen	Institut für integriertes Design	Prof. Dr.-Ing. Kraus; Prof. Dr. Detlef Rahe
13	International University Bremen	Biochemical Engineering; Biophysics	Prof. Dr. Ulrich Schwaneberg; Prof. Dr. Mathias Winterhalter
14	Universität Bremen	FG Technikgestaltung und Technologieentwicklung; Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft; Institut für Mikrosensoren, -Aktoren und -systeme; FG Keramische Bauteile und Werkstoffe	Prof. Dr. Arnim von Gleich; Prof. Dr.- Ing. Bernd Scholz-Reiter; Prof. Dr.-Ing. Walter Lang; Prof. Dr.-Ing. Georg Grathwohl; Prof. DR. Ing. Kurosch Rezwan; PD Dr. Monika Fritz

Nr.	Hochschule	Institution/Abteilung	Personen (Leitung)
15	TU Clausthal	Institut für Nichtmetallische Werkstoffe	Prof. Dr. Jürgen G. Heinrich; Dr. Lothar Wondraczek
16	TU Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt (BitZ)	Prof. Dr. C. Tropea (Sprecher), Dr. H. Bargel (Geschäftsführung)
17	Universität Dortmund	Fachgebiet Logistik	Dipl.-Ing. Katja Nowka
18	TU Dresden	Institute of Waste Management and Contaminated Site Treatment; Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik; Institut für Stahl- und Holzbau; Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik; Lehrstuhl für Botanik	Prof. Dr. Peter Werner; Dr.-Ing. Frank Schulze; Prof. Dr.-Ing. Peer Haller; Dipl.-Ing. Beate Buchelt; Prof. Dr. C. Neinhuis
19	Universität Duisburg-Essen	Institut für Produkt Engineering	Prof. Dr.-Ing. Peter Köhler
20	Universität Erlangen Nürnberg	Institut für Werkstoffwissenschaften Glas und Keramik	Dr. Frank A. Müller
21	TU Freiberg	Institut für Mechanik und Strömungsmechanik	Prof. Dr.-Ing. Brücker
22	Universität Freiburg	Botanischer Garten, Kompetenznetz Biomimetik; Lehrstuhl Konstruktion von Mikrosystemen	Prof. Dr. Thomas Speck; Dr.-Ing. Elmar Just; Dr.-Ing. Norbert Kockmann
23	FH Furtwangen	Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik	Prof. Dr.-Ing. Tawakoli; Prof. Dr.-Ing. Kubisch
24	Universität Giessen	Institut für Angewandte Physik	PD Dr. von Kreutzbruck
25	Universität Göttingen	Institut für Forstzoologie und Waldschutz	Prof. Dr. S. Schütz
26	Universität Halle-Wittenberg	Institut für Polymerwerkstoffe (IPW) e.V.; Institut für Pflanzenzüchtung und Pflanzenschutz; Institut für Bioengineering	Dipl.-Phys. Sven Henning; Prof. Dr. Holger B. Deising; Prof. Dr. Markus Pietzsch
27	Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf	Poliklinik für Kieferorthopädie	PD Dr. Klocke
28	Medizinische Hochschule Hannover (MHH)	Abteilung Rheumatologie	Jens G. Kuipers
29	Universität Hohenheim	Institut für Umwelt- und Tierhygiene	Prof. Dr. Böhm

Nr.	Hochschule	Institution/Abteilung	Personen (Leitung)
30	TU Ilmenau	Fachgebiet Biomechatronik	Prof. Dr. Helmut Wurmus; PD Dr.-Ing. Lena Zentner; Dr.-Ing. Emil Kolev; Dr. Cornelius Schilling; Prof. Dr. Hartmut Witte
31	Universität Jena	Institut für Biochemie II; Locomotion Laboratory	Dr. Jörg -Hermann Ozegowski; Dr. Seyfarth
32	TU Kaiserslautern	Lehrstuhl Integrierte Sensorsysteme; AG Robotersysteme (FB Informatik),	Prof. Dr.-Ing. König; Prof. Dr. Berns
33	Universität Karlsruhe	Institut für angewandte Informatik/ Automatisierung (AIA)	Dipl.-Ing. Thorsten Röllich
34	Universität Kassel	Fachgebiet Tragwerkslehre; Fachgebiet Strömungsmaschinen	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Lawerenz
35	Universität Koblenz-Landau	Zentrum für Human Resource Management	Dr. Martina Sailer
36	FH Köln	Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik	C. Hacker
37	Universität Leipzig	Institut für Grundlagen des Bauens und Planungsmanagement; Sächsisches Institut für Angewandte Biotechnologie; Institut für Anatomie,	Prof. Dipl.-Ing. Architekt Bukhard Pahl; Dr. J. Ondruschka; Dr. Thomas Wiener
38	Universität Lüneburg	Technische Informatik	Prof. Dr.-Ing. Welge
39	FH Magdeburg-Stendal	FB Ingenieurwesen und Industriedesign	Prof. Dr. Wohlgemut
40	Hochschule Mannheim	Institut für Biologische Verfahrenstechnik; Institut für Konstruktionslehre/CAD	Prof. Dr. Kunz; Prof. Dr. K. Peschges
41	FH München	FB Elektrotechnik und Informationstechnik	Prof. Dr. Wassermann
42	TU München	Lehrstuhl Lebensmittelverpackungstechnik ; Lehrstuhl Biotechnologie	Dr.-Ing. Kajetan Müller; Dr. Scheibel
43	Universität der Bundeswehr München	Institut für Mechanik und Statik	Prof. Dr.-Ing. Norbert Gebbeken
44	FH Münster	Labor für Strömungstechnik	Prof. Dr.-Ing. Jantzen
45	Universität Münster	Institut für Technik und ihre Didaktik	Prof. Dr. B. Hill
46	Universität Potsdam	Analytische Biochemie	Dr. Axel Warsinke

→ Fortsetzung nächste Seite

Nr.	Hochschule	Institution/Abteilung	Personen (Leitung)
47	FH Reutlingen	Institut für Angewandte Forschung	Prof. Dr. Gerhard Schulz
48	Universität Rostock	Institut für Angewandte Mikroelektronik	Prof. Dr.-Ing. habil. Ralf Salomon
49	Hochschule Saarbrücken	Institut für Produktentwicklung und -optimierung, InPEO; Fachbereich Architektur	Prof. Dr. H.-J. Weber; Prof. Dr. G. Pohl
50	Universität des Saarlandes, Saarbrücken	BioKoN-Standort Saarbrücken	Prof. emerit. Dr. W. Nachtigall
51	FH Schmalkalden	Wirtschaftswissenschaften	Prof. Dr. Friedrich Kugler
52	Universität Stuttgart	Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT); Institut für Werkzeugmaschinen	Dr.-Ing. Andreas Bröcker; Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Tröger; Dipl.-Ing. Stojanka Ivanova
53	FH Südwestfalen	Elektrische Energietechnik	Dr.-Ing. Berthold Bitzer
54	Universität Tübingen	Zentrum für Bioinformatik (ZBIT); Institut für Physikalische und Theoretische Chemie; Anatomisches Institut; Institut für Geowissenschaften; Institut für Organische Chemie; Wilhelm-Schickard-Institut	Dipl.-Ing. Felix Strechert; Privatdozent Dr. Udo Weimar; Dipl.-Ing. Timo Schmidt; Dr. Anita Roth-Nebelsick; Dr. Bernd Görlach; Dipl.-Phys. Achim Lilienthal
55	Universität Ulm	Biomimetische und bioanorganische Chemie; Institut für Neurobiologie;	Prof. Dr. Dirk Volkmer; Dr. Fritz-Olaf Lehmann;
56	Universität Weimar	Hydrolabor Schleusingen	Dr. Kranawettreiser
57	Internationales Hochschulinstitut Zittau	Environmental Process Engineering	Dr.-Ing. Kayser
58	Westsächsische Hochschule Zwickau	Fachbereich Textil- und Ledertechnik	Prof. Dr. Hessberg

Erkenntnisse in technische Anwendungen befasst, ist jedoch weder im „BioKoN“ noch im „KN Biomimetik“ und fehlt daher auch in Tabelle 7. Die Universität Augsburg taucht ausschließlich in Tabelle 10 auf. Dort werden am Lehrstuhl für Systemnahe Informatik und Kommunikationssysteme Forschungen und Entwicklungen nach dem Vorbild der Natur betrieben. Es geht unter anderem um „Organic Computing“

mit einer Orientierung an biologischen Prinzipien und Leistungen wie „Selbstheilung“ oder „Selbstoptimierung“. Solche bionischen Inhalte sind auch Bestandteil der Lehre, wie Seminare wie „Bio-Inspired & Grid-Computing“ belegen.[80] Demnach würde die Universität Augsburg problemlos in eines der Bionik-Netzwerke aufgenommen werden können, was jedoch allem Anschein nach bisher noch nicht angestrebt worden ist.

Unterschiedliche Bionik-Selbstverständnisse

Es gibt also unterschiedliche Arten des Selbstverständnisses bei den verschiedenen Akteuren im Bionik-Bereich, wobei sich drei Gruppen von Akteuren unterscheiden lassen. Einige Personen/Institutionen – vor allem diejenigen, die in den Netzwerken organisiert sind – verstehen sich als Bioniker und ordnen ihre Arbeit auch unter diesen Begriff („Bionik im engen Sinne“). Bei anderen finden der Begriff „Bionik“ nie und auch Begriffe wie „Biomimetik“ oder „biologisch inspiriert“ äußerst selten Verwendung. Diese Akteure arbeiten aber in Bereichen wie bspw. „Organic Computing“ oder „Künstliche Photosynthese“, denen der Gedanke des „Lernens von der Natur/Biologie“ bereits inhärent ist („Lernen von der Natur“). Die Mitglieder einer dritten Gruppe schließlich verstehen sich in erster Linie als Biologen, Ingenieure, Materialwissenschaftler, Chemiker etc. und bezeichnen sich auch als solche. Daneben betreibt diese dritte Gruppe – entweder hauptsächlich oder vereinzelt – „biomimetische“ oder „biologisch inspirierte“ Forschung und Entwicklung. Die Tatsache, dass eine Form des „Lernens von der Natur/Biologie“ bei diesen Arbeiten eine Rolle spielt/gespielt hat, wird zwar hier und da expliziert, steht jedoch nicht im Vordergrund (Grenzfälle zwischen den Kategorien „Bionik im engen Sinne“ und „Lernen von der Natur“).

Viermal so viele außeruniversitäre F&E-Einrichtungen, die in Bionik-Aktivitäten involviert sind oder waren, sind im Vergleich zu Tabelle 8 in Tabelle 11 zusammengefasst. Auch hier werden von den zusätzlich aufgeführten außeruniversitären F&E-Einrichtungen aber oft nur sporadisch und in kleinem Umfang im engen Sinne „bionische“ F&E bzw. F&E „nach dem Vorbild der Natur“ betrieben.

Bei den Unternehmen ist die Diskrepanz zwischen den in den Netzwerken vertretenen Akteuren und jenen, die über Konferenzen, Experteninterviews und die GTBB identifiziert werden konnten, am auffälligsten (9 zu 75). Es wurden allerdings auch einige Unternehmen über eine umfangreiche Internetrecherche identifiziert, wobei ein solcher „Treffer“ immerhin voraussetzt, dass diese Unternehmen sich positiv

80 siehe Internetseite des Lehrstuhls für Systemnahe Informatik und Kommunikationssysteme: http://www.informatik.uni-augsburg.de/lehrstuehle/swt/vs/lehre/WS_06_07/seminar/ (Zugriff: Januar 2007)

Tabelle 11 — Außeruniversitäre F&E-Einrichtungen in Deutschland mit bionischen Aktivitäten

Nr.	Institution	Abteilung(en)	Personen (Leitung)
1	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, AWI, Bremerhaven	Biological Oceanography; Plancton Biomechanics;	Dr. Markus Geisen; Dr. Christian Hamm
2	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR,	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig; Institut für Antriebstechnik, Köln/ Berlin/Göttingen	Dr. Jörg Melcher; Dr. Wolfram Hage
3	Faserinstitut Bremen e. V., FIBRE	Kompetenzfeld: Naturnahe Werkstoffe/Nachhaltigkeit	Dr.-Ing. Jörg Müssig
4	Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V., BioKoN, Berlin	-	Dr. Rudolf Bannasch
5	Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V.	Fachbereich Biotechnologie/Bionik	Dr.-Ing. W. Berger
6	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, FZK	Institut für Angewandte Informatik; Institut für Nanotechnologie; Institut für Materialforschung II	Dr. Ing. Stefan Schulz; PD Dr. Teodor Silviu Balaban; Prof. Dr. Claus Mattheck;
7	Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, IME, Aachen	Funktionelle und Angewandte Genomik	Dr. Dirk Prüfer
8	Fraunhofer Institut Biomedizinische Technik, IBMT, St. Ingbert	Arbeitsgruppe Miniaturisierte Systeme; Arbeitsgruppe Mikrosysteme/Lasermedizin; Arbeitsgruppe Magnetische Resonanz	Dipl.-Ing. Heiko Andresen; Prof. Dr. Heiko Zimmermann; Dr. Peter Geggier; Dr. Oliver Scholz; Frau Dr. Iris Riemann; Dr. Bertram Manz
9	Fraunhofer Institut Chemische Technologie, ICT, Pfinztal	(Abteilung mittlerweile aufgelöst)	Dipl.-Ing. Günter Helferich
10	Fraunhofer Institut Fertigungstechnik Materialforschung, IFAM, Bremen	Klebstoffe und Polymerchemie; Zellulare Metallische Werkstoffe	Dr. Klaus Rischka; Dr. Volkmar Stenzel; Dr. Andreas Hartwig; Dr. Günter Stephani; Dr. Ingo Grunwald
11	Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit, LBF, Darmstadt	Demonstrationszentrum SIMTOP	Dipl.-Ing. Klaus Störzel

Nr.	Institution	Abteilung(en)	Personen (Leitung)
12	Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Fabrikautomatisierung, IFF, Magdeburg	Robotersysteme; Virtual Engineering	Dr. Norbert Elkmann; Dr. Oliver Lange; Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker
13	Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung, IGD, Darmstadt	Visualisierung und Virtuelle Realität	Dr. Ulrich Bockholdt
14	Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, IGB, Stuttgart	Biomimetische Grenzflächen; Pharmaproteine und Targetscreening	Dr. Günter Tovar; Dr. Steffen Rupp
15	Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK, Berlin	Bereich Automatisierung und Robotik	Frau Dipl.-Ing. Jelena Radojicic;
16	Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung, IPA, Stuttgart	Robotersysteme; Technische Informationsverarbeitung; Innovationsmanagement	Christian Meyer; Dipl.-Ing. Harald Staab; Dipl.-Phys. Jens Pannekamp; Dipl.-Phys. Knut Drachsler
17	Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik, UMSICHT, Oberhausen	Spezialwerkstoffe	Dipl.-Ing. Jürgen Bertling, Dipl.-Ing. Marcus Rechberger
18	Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik, IPM, Freiburg i. Br.	Prozessmesstechnik (Sensorik)	Dr. Jürgen Wöllenstein
19	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE, Freiburg i. Br.	thermische Solaranlagen	Dipl.-Ing. Michael Hermann
20	Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, ITWM, Kaiserslautern	Strömungen und komplexe Strukturen	Priv.-Doz. Dr. Arnulf Latz
21	Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. (Gfal), Berlin	Bereich Signalverarbeitung	Dr. Ralf Schröder; Dr. Olaf Jaeckel
22	Hahn-Meitner-Institut, HMI, Berlin	Solare Energetik	Prof. Dr. Helmut Tributsch

→ Fortsetzung nächste Seite

Nr.	Institution	Abteilung(en)	Personen (Leitung)
23	Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim e.V., ATB	Technik im Pflanzenbau	Dr.-Ing. Hans-R. Langner
24	Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft e. V., HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen	Mikrodosiersysteme	Dipl.-Ing. Thorsten Göttsche
25	Institut für Physikalische Hochtechnologie e. V., IPHT, Jena	AG Biotechnische Mikrosysteme	Dr. rer.nat. Wolfgang Fritzsche
26	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf	Forschungsgruppe Bionik	Dr. Thomas Stegmaier; Dipl.-Ing. Michael Linke; Dr. Markus Milwich
27	Max-Planck Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, MPI-KG, Potsdam	Abteilung Biomaterialien	Dr. Ingo Burgert
28	Max-Planck Institut für terrestrische Mikrobiologie, MPI-TM, Marburg	Abteilung Organismische Interaktionen	Dr. Michael Feldbrügge
29	Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart	Evolutionary Biomaterials Group	Frau Dr. Ulrike Wegst; Dr. Stanislav Gorb; Dr. Pablo Perez-Goodwynn
30	Nieklitzer Ökologie- und Ökotechnologie-Stiftung	Gründer und Vorsitzender	Prof. Dr. Bernd Heydemann
31	Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, UFZ	Grundwassersanierung	Dr. Arno Kaschl
32	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, BAM, Berlin	Material und Umwelt	Frau Dr. Kemmlein; Dr. Medianpour
33	Deutsches Krebsforschungszentrum, DKFZ, Heidelberg	Funktionelle Genomanalyse	Dr. Frohme
34	Papiertechnische Stiftung München	Papier-Keramik	Frau Dipl-Ing. Kirmeier
35	Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., STFI, Chemnitz	Gewirke/Gewebe	Mählmann
36	Stiftung caesar, Bonn	Biotechnologie	Dr. Cerboncini

auf bionische Ansätze beziehen und ggf. auch damit werben. Wie stark das Engagement dann aber tatsächlich ist, bleibt jedoch unklar.

Im Bereich Bionik aktive Unternehmen

Die in Tabelle 12 dem Alphabet nach aufgeführten Unternehmen zeigen, dass das Feld Bionik nicht nur in wissenschaftlicher Hinsicht, sondern auch im Bereich der Anwendung eine außerordentlich große Bandbreite aufweist. Zur besseren Einschätzung der wirtschaftlichen Bionik-Akteure sind die Unternehmen verschiedenen Branchen zugeordnet. Um eine gewisse Vergleichbarkeit herstellen zu können, sind die Branchen-Typen sehr grob gestaltet worden. Zudem sind die Produkte und Verfahren (in Einzelfällen auch Dienstleistungen) der jeweiligen Unternehmen einer Klasse zugeordnet, wobei hierbei ebenfalls eine eher grobe Klassifikation der Bionik in Anlehnung an die Strukturierung von Nachtigall (2002) zugrunde gelegt worden ist. Dort, wo entsprechende Informationen vorlagen, ist auch das Bionik-Prinzip angegeben, welches bei den jeweiligen Produkten/Verfahren zur Anwendung kommt (bspw. Lotuseffekt), um diesbezügliche quantitative Häufungen sichtbar zu machen. Schließlich ist in der letzten Spalte angegeben, in welcher Phase des Innovationsprozesses sich das jeweilige Produkt/Verfahren befindet, um einen qualitativen Eindruck vom Fortschritt bzw. Erfolg der bionischen Innovationen zu erhalten. Als (chronologisch) idealisierte Innovationsphasen wurden dabei die Phasen „Prototyp/Demonstrationsanlage“, „Markteinführung“ und „Marktdurchdringung“ unterschieden.

Konkrete Bionik-Aktivitäten von Unternehmen

Auch hier muss davon ausgegangen werden, dass etliche Unternehmen bionische Forschung und Entwicklung betreiben und/oder entsprechende Produkte vermarkten, dies jedoch nicht explizieren. So machen einige der von Interviewpartnern aus Hochschulen und/oder außeruniversitären F&E-Einrichtungen als Partner genannten Unternehmen ihr Engagement nicht (internet-)öffentlich. Als Beispiel kann die Firma Okalux angeführt werden, die ein nach dem Vorbild des Eisbärfells entwickeltes, Wärme isolierendes, transparentes Glas für Fenster und Fassaden herstellt und vertreibt,[81] sich selbst jedoch in keiner Weise öffentlich mit Bionik in Verbindung bringt. Die Ergebnisse der Unternehmensrecherche enthalten also einen hohen Anteil von Unsicherheiten, insbesondere was die Intensität und Qualität des jeweiligen bionischen Engagements anbelangt.[82]

---

81 Siehe Dokumentation der Wanderausstellung „Inspiration Natur: Patentwerkstatt Bionik“ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), S.18f; Download unter: http://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/111206120202e29f.pdf (Zugriff: Januar 2007).

82 Die leeren Zellen in Tabelle 12 bedeuten, dass in einigen Fällen selbst nach vergleichsweise intensiver Recherche die fehlenden Informationen nicht zu beschaffen waren.

Tabelle 12 — Unternehmen in Deutschland mit bionischen Aktivitäten

Nr.	Firma	Branche	Klassifikation Bionik	Bionik-Prinzip	Innovationsphase (Jahr)
1	3M Deutschland	Chemie	Struktur, Form und Funktion*	Haifischhaut	Prototyp/ Demonstrations-anlage (1996)
2	Adam Opel AG	Automobil	Struktur, Form und Funktion*, Lokomotion, Transport**	Leichtbau, Fluiddynamik	Prototyp/ Demonstrations-anlage
3	Airbus	Luftfahrt	Struktur, Form und Funktion*	Leichtbau, Haifischhaut	Prototyp/ Demonstrations-anlage
4	Alan Sportartikel GmbH	Sport	Struktur, Form und Funktion*	Form	Markteinführung
5	Armstrong DLW AG	Bau	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
6	Audi AG	Automobil	Struktur, Form und Funktion*	Bionic Design	Prototyp/ Demonstrations-anlage
7	BASF	Chemie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
8	Bionic Solutions	Unternehmens-beratung	Extra***	Unternehmensberatung	–
9	Bionic StreamForm	Unternehmens-beratung	Lokomotion, Transport**	Fluiddynamik	–
10	Bionicon-Inwall GmbH	Fahrrad	Struktur, Form und Funktion*	Form	–
11	Bionik Design	Medien	Extra***	Medien	–
12	BIONIK Media GmbH	Medien	Extra***	Medien	–
13	Bionik-Systeme Bremen	Leitungsbau	Struktur und Form	Fluss-Mäander	Markteinführung
14	BMT Bionic Maritime Technologies GmbH	Elektronik/ Elektrotechnik	Sensorik/Informations-verarbeitung	Sensorik	Markteinführung
15	BMW	Automobil	Struktur, Form und Funktion*, Lokomotion, Transport**	Fluiddynamik, Leichtbau, Lotuseffekt	Marktdurchdringung
16	Chendo GmbH	Medizintechnik	Prothetik, Materialien und Werkstoffe	Leichtbau, Prothetik	–

Nr.	Firma	Branche	Klassifikation Bionik	Bionik-Prinzip	Innovationsphase (Jahr)
17	ComNac - Communication Networks Aachen GmbH	Software	Optimierung	effiziente Informationssuche	–
18	Continental	Automobil	Struktur, Form und Funktion*	Winterreifen Eisbärpfoten	Marktdurchdringung
19	Daimler Crysler	Automobil	Struktur, Form und Funktion*, Lokomotion, Transport**	Fluiddynamik, Leichtbau	Prototyp/ Demonstrations-anlage
20	Degussa AG/ Degussa Creavis Technologies & Innovations	Chemie	Struktur, Form und Funktion	Lotuseffekt	Marktdurchdringung
21	Dr. Mirtsch GmbH	Metallerzeugung und -verarbei-tung	Materialien und Werkstoffe	Selbstorganis. Wölbstruktur, Versteifung	–
22	Dr. Sander & Associates Software GmbH	Software	Optimierung, Systemdesign (Industrial Ecology)	Schwarmintelligenz	–
23	Duravit AG	Sanitärkeramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
24	EADS Deutschland GmbH	Luftfahrt	Struktur, Form und Funktion*	Leichtbau	Markteinführung
25	Erlus	Keramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
26	EvoLogics	Sensortechnik, Unterwasser-kommunikation, Robotik	Sensorik, Struktur, Form und Funktion	Fluiddynamik, Robotik, Sensorik	Testversuche/ Markteinführung?
27	EWABO Chemikalien GmbH & Co.KG	Chemie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
28	Ferro Corporation	Chemie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Prototyp/ Demonstrations-anlage
29	Festo AG & Co. KG	Elektronik/ Elektrotechnik	Robotik	Künstl. Muskel	–

→ Fortsetzung nächste Seite

Nr.	Firma	Branche	Klassifikation Bionik	Bionik-Prinzip	Innovationsphase (Jahr)
30	Franz Kaldewei GmbH & Co. KG	Sanitärkeramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
31	Friedrich Graepel AG	Metallerzeugung und -verarbeitung	Struktur, Form und Funktion*	Form	Marktdurchdringung
32	Fumedica GmbH	Medizintechnik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt, Haifischhaut	Markteinführung/ Marktdurchdringung
33	GFaI	Elektronik/ Elektrotechnik	Sensorik und Informationsverarbeitung	Sensorik	Marktdurchdringung
34	Goldschmidt AG (zu Degussa Gruppe)	Chemie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
35	Heidenreich & Harbeck AG	Maschinenbau, GießereiBau	Optimierung	Bioalgorithmen	–
36	Ideal Standard	Sanitärkeramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
37	Innovent GmbH	Bau	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
38	Institut für Bionik	Unternehmens-beratung	Extra***	Unternehmensberatung	–
39	Interton Hörgeräte GmbH	Medizintechnik	Sensorik und Informationsverarbeitung	Sensorik	Marktdurchdringung
40	Keramag AG	Sanitärkeramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
41	Kleinmann GmbH	Reinigungs-produkte	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
42	Koralle-Sanitärprodukte GmbH	Sanitärkeramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
43	KUKA Roboter GmbH	Maschinenbau	Robotik, Sensorik und Informationsverarbeitung	Sensorik, Robotik	Marktdurchdringung
44	Living Systems GmbH in „Whitestein Technologies“ aufgegangen	Software	Systemdesign (Industrial Ecology)	Schwarmintelligenz	Markteinführung
45	LTG Aktiengesellschaft	Bau	Energieumwandlung, -nutzung	Belüftung	Marktdurchdringung
46	Miele & Cie. KG	Elektrogeräte	Materialien und Werkstoffe	Wölbstruktur	Marktdurchdringung

Nr.	Firma	Branche	Klassifikation Bionik	Bionik-Prinzip	Innovationsphase (Jahr)
47	M-PORE GMBH	Metallerzeugung und -verarbeitung	Materialien und Werkstoffe	Leichtbau	–
48	Nano Maxi	Nanotechnologie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
49	Nano X GmbH	Nanotechnologie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
50	NanoConcept	Nanotechnologie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
51	NanoScape AG	Nanotechnologie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
52	NuTech Solutions	Unternehmensberatung	Extra***	Unternehmensberatung	–
53	Okalux	Bau	Struktur, Form, Funktion	Transparente Wärmedämmung (Glas) nach Eisbärfellprinzip	Markteinführung/ Marktdurchdringung
54	Össur Europe	Medizintechnik	Prothetik	Prothetik	Marktdurchdringung
55	Otto Bock Healthcare GmbH	Medizintechnik	Prothetik	Prothetik	Marktdurchdringung
56	Percenta Europe Ltd.	Nanotechnologie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
57	Phonak GmbH	Medizintechnik	Sensorik/Informationsverarbeitung, Struktur, Form und Funktion *	Sensorik, Lotuseffekt	Marktdurchdringung
58	Pohl Architekten	Architektur	Struktur, Form und Funktion*, Energieumwandlung, -nutzung	Leichtbau, Belüftung	–
59	Ravensburger	Medien	Extra***	Medien	–
60	Rheinzink	Bau	Materialien und Werkstoffe	Wölbstruktur	Marktdurchdringung
61	Rittal GmbH & Co. KG	Bau	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
62	Schöller Textil AG	Textil	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt, Funktion	Markteinführung
63	Siemens AG	Elektronik/ Elektrotechnik	Sensorik/Informationsverarbeitung, Systemdesign (Industrial Ecology)	Sensorik, Schwarmintelligenz	Markteinführung

→ Fortsetzung nächste Seite

Nr.	Firma	Branche	Klassifikation Bionik	Bionik-Prinzip	Innovationsphase (Jahr)
64	Siteco Beleuchtungstechnik GmbH	Beleuchtung	Materialien und Werkstoffe	Wölbstruktur	Marktdurchdringung
65	SolarEnergie Stefanakis	Solarenergie	Energieumwandlung, nutzung	Funktion	–
66	Sortimo International GmbH	Automobil	Struktur, Form und Funktion*	Leichtbau	–
67	Speedo Deutschland GmbH	Textil	Struktur, Form und Funktion*	Haifischhaut	Markteinführung/ Marktdurchdringung
68	Sto AG	Bau	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Marktdurchdringung
69	Suntec-Orga	Energie	Struktur, Form und Funktion	Solarblume	Markteinführung
70	Tiger Coatings	Nanotechnologie	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
71	Trolining GmbH	Bau	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt, Haifischhaut, Form	Markteinführung
72	Velcro GmbH	Textil	Struktur, Form und Funktion*	Funktion Klettverschluss	Marktetablierung
73	Villeroy & Boch	Keramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung
74	VitrA Bad GmbH	Sanitärkeramik	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	–
75	Volvo	Automobil	Struktur, Form und Funktion*	Lotuseffekt	Markteinführung

*)=einschließlich „Oberflächen und Grenzflächen“

**)=einschließlich „Fluiddynamik“

***)=um die Klassifikation nicht zu unübersichtlich werden zu lassen, ist für all diejenigen Produkte/Verfahren, die keiner der Hauptklassen zugeordnet werden konnten, die Klasse „Extra“ gebildet worden.

Lotuseffekts dominiert

Auffällig an der Zusammensetzung der Unternehmen und der von diesen angebotenen Produkte und Verfahren ist die sehr deutliche Dominanz des sogenannten „Lotuseffekts“, bei welchem die Oberflächenstruktur des Lotusblatts technisch nachgeahmt wird, um bestimmte Oberflächeneigenschaften wie bspw. „Selbst-“Reinigung zu erreichen. Fast die Hälfte aller Produkte und Verfahren in Tabelle 12 ist diesem Bereich zuzuordnen, wobei bei einigen Unternehmen Zweifel bestehen, inwiefern tatsächlich eine Übertragung biologischer Erkenntnisse in

ein technisches Produkt stattgefunden hat, oder ob nicht das Label „Lotus“ ausschließlich aus marketingtechnischen Gründen und eigentlich unberechtigterweise verwendet wird. In solchen Fällen könnte – wenn überhaupt – nur eine eigens angestellte physikalische Untersuchung der jeweiligen Produkte Aufschluss geben, da die betroffenen Firmen selbst wohl kaum zugeben würden, sich zu Unrecht auf den (relativ erfolgreichen) Lotuseffekt zu berufen.

Viel Grundlagen- und angewandte Forschung, aber wenige marktreife Produkte und Verfahren

Weiterhin wird bei der Betrachtung der Unternehmen mit Bezug zu Bionik deutlich, dass bei den Produkten und Verfahren, bei welchen entsprechende Informationen vorlagen, nur in der Minderheit der Fälle die jeweiligen Produkte oder Verfahren bereits in den Markt eingeführt wurden oder diesen sogar breit durchdrungen haben. In der überwiegenden Zahl der Fälle handelt es sich um Prototypen/Demonstrationsverfahren – bei vielen Fällen, zu denen keine gesicherten Angaben gewonnen werden konnten (Betriebsgeheimnis), kann zudem davon ausgegangen werden, dass sich die Produkte/Verfahren erst in einem frühen Stadium der F&E befinden. So ergibt sich schließlich ein Bild der deutschen Innovationslandschaft Bionik, in dem wenige erfolgreiche Innovationen stark verbreitet sind, einige Innovationen kurz- bis mittelfristig zu erwarten sind und vieles (wenn nicht gar der größte Teil) im Dunkeln bleibt und sich einer differenzierten Analyse entzieht.

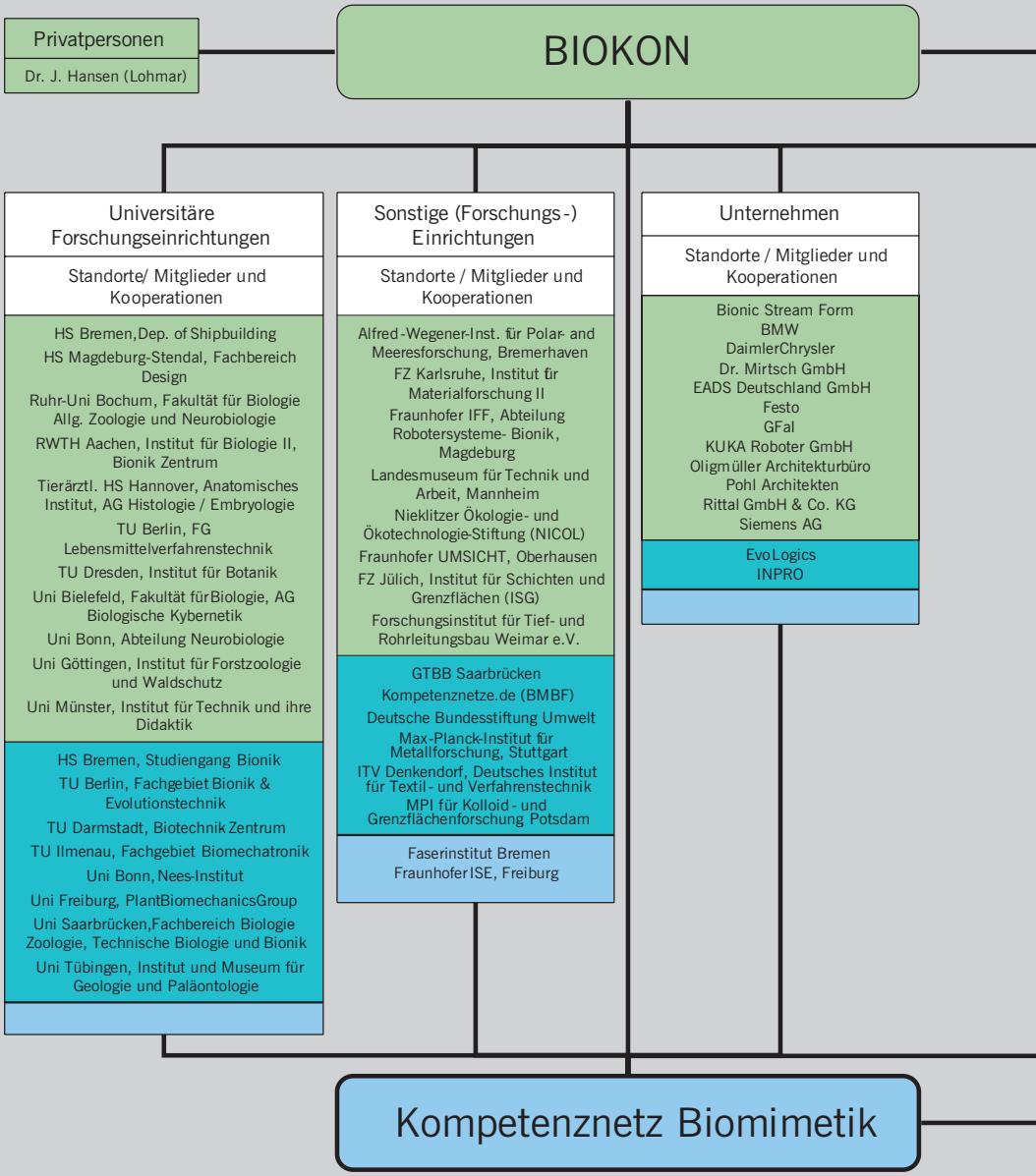
4.4 Vernetzungsaktivitäten und -intensitäten zwischen den Akteuren

Beziehungen von Bionik-Akteuren zum BioKoN und KN-Biomimetik

Im Zuge der Identifikation entstand zunächst der Eindruck, die verschiedenen Akteure würden – abgesehen von den Netzwerken „BioKoN“ und „KN Biomimetik“ – nur wenig miteinander in Beziehung stehen. Daher ist in einem nächsten Schritt untersucht worden, ob und welche Verbindungen es zwischen welchen Akteuren gibt. Als Verbindung zwischen zwei oder mehr Akteuren gilt in diesem Zusammenhang ein dokumentierter Zusammenhang zwischen den Akteuren, entweder als bloßer Kontakt, als Kooperation oder als institutionalisierte Verbindung (bspw. offizielle Einbindung in Netzwerke). Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Abbildung 5 und der Abbildung 6 einmal grafisch dargestellt.

Abbildung 5 macht zunächst deutlich, dass die beiden Bionik-Netzwerke größer erscheinen, wenn nicht nur die als Mitglieder registrierten Akteure, sondern auch die mit diesen in Verbindung stehenden in die Darstellung mit einbezogen werden (die grünen [BioKoN], blauen

Abbildung 5 — Zugehörigkeit von Hochschulen, außeruniversitären F&E-Einrichtungen und Unternehmen zu den Netzwerken »BioKoN« und »KN Biomimetik«



[Quelle: eigene Darstellung]

Träger und Förderer

DLR
BMBF

Intern. Unternehmen, Netzwerke und Forschungseinrichtungen

Mitglieder, Kontakte und Kooperationen

Uni Zürich, Artificial Intelligence Laboratory (Schweiz)
Univ. of Groningen, Department of Marine Biology (Niederlande)
Technical Museum of Slovenija Ljubljana
BIONIS (UK)
European Space Agency EU

Univ. of Bath, Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Design (UK)
University of Reading Dept. of Engineering, Center for Biomimetics (UK)
Fastech Europe AG (Schweiz)

Prospective concepts (Schweiz)
Bionic Design – National Institute for Advanced Interdisciplinary Research NAIR (Japan)
Cicada EU
Institute of Biocybernetics and Biomedical Engineering Warschau (Polen)
Biomimetics, Duke University Durham (USA)
Universität für Bodenkultur Wien (Österreich)

Unternehmen

Bei Bionik-Konferenzen vertreten oder anderweitig in der »Bionik-Community« aktiv

Adam Opel AG
Airbus
Audi AG
BASF
Bionic Solutions
BIONIK Media GmbH
Continental
Degussa AG
Erlus
Goldschmidt AG (Degussa Gruppe)
JamborCar Innovations
LTG Aktiengesellschaft
Miele & Cie. KG
M-PORE GmbH
OHB System AG
Otto Bock Healthcare GmbH
SolarEnergie Stefanakis
Speedo Deutschland GmbH
Sto AG
Tetra GmbH
Volkswagen

Unternehmen

Kontakt zu Instituten oder Unternehmen, die in der Bionik-Community aktiv sind

Bionik Systeme Bremen
Dr. Sander & Associates Software
Friedrich Graepel AG
Ravensburger
Rheinzink
Siteco Beleuchtungstechnik GmbH
Trolining GmbH

Unternehmen

Nicht vernetzte mit bionischen Produkten/Dienstleistungen

3M Deutschland
Alan Sportartikel GmbH
Armstrong DLW AG
Bionic Maritime Technologies
Bionicon-Inwall GmbH
Bionik Design
Chendo GmbH
GmbH
Duravit AG
EWABO Chemikalien GmbH & Co.KG
Franz Kaldewei GmbH & Co. KG
Fumedica GmbH
Ideal Standard
Innovent GmbH
Institut für Bionik
Interton Hörgeräte GmbH
Keramag AG
Kleinmann GmbH
Koralle-Sanitärprodukte GmbH
Madaus AG
Nano Maxi
Nano X GmbH
NanoConcept
NuTech Solutions GmbH
Össur Europe
Percenta Europe Ltd.
Phonak GmbH
Schöller Textil AG
Sortimo International GmbH
Velcro GmbH
Villeroy & Boch
VitrA Bad GmbH
Volvo

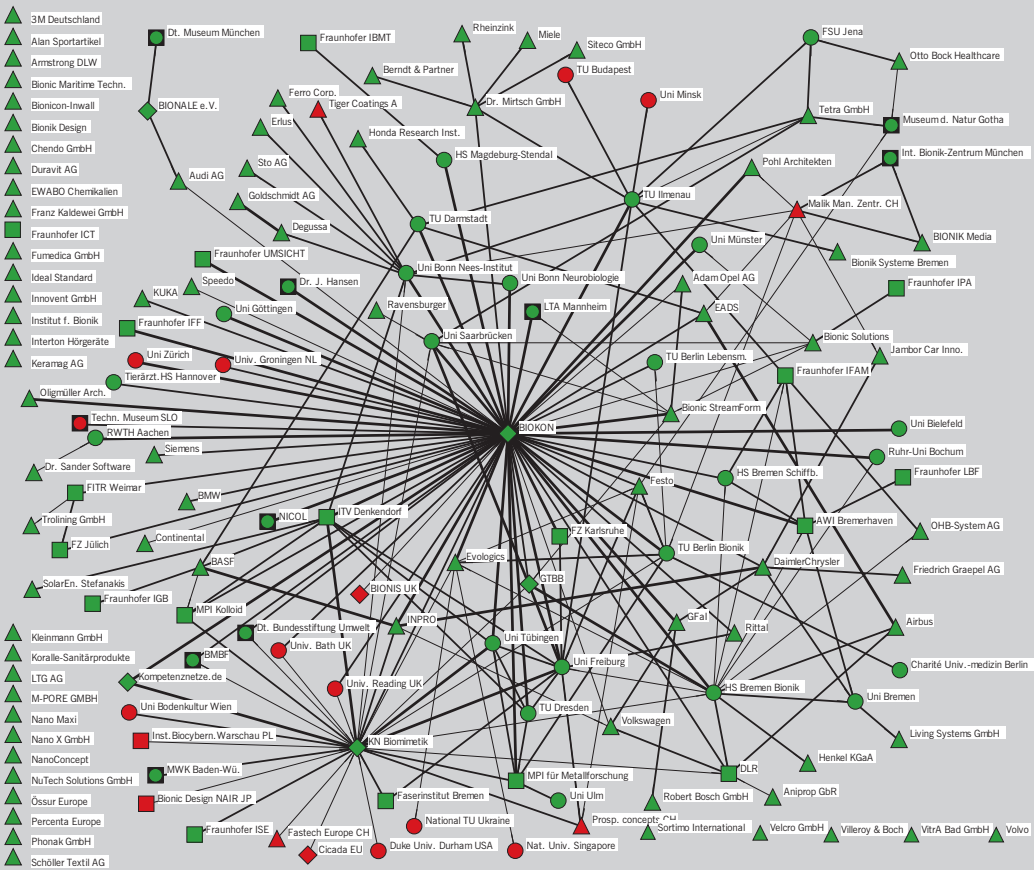
Förderer

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

Legende

Kooperation / Mitgliedschaft mit:
- BIOKON
- BIOKON und KN Biomimetik
- Kompetenznetz Biomimetik
- unbestimmt

Abbildung 6 — Art und Grad der Vernetzung zwischen den einzelnen Hochschulen, außeruniversitären F&E-Einrichtungen und Unternehmen



Legende: Kreis=Hochschule, Quadrat=außeruniversitäre F&E, Dreieck=Unternehmen, Raute=Netzwerkknoten, grün=deutsch, rot=nicht deutsch, Dicke der Linien ist proportional zur Intensität der Vernetzung

[Quelle: eigene Darstellung]

[KN Biomimetik] und türkisen [beide Netzwerke] Bereiche). Gleichzeitig zeigt die Abbildung aber auch, dass in vielen Fällen, insbesondere bei den identifizierten Unternehmen, keinerlei Verbindungen zu einem der Netzwerke gefunden werden konnten [die grauen Bereiche]. Zwar besteht immer noch eine gewisse Unsicherheit darüber, ob die betreffenden Akteure tatsächlich keinerlei Kooperationen mit den Akteuren innerhalb der Netzwerke eingegangen sind, oder ob sie diese nur nicht öffentlich machen (aus marktstrategischen Gründen). Tendenziell

scheint jedoch die Aussage zutreffend, dass Bionik in Deutschland vielfach auch (noch) außerhalb der bestehenden institutionalisierten Netzwerke betrieben wird.

Vernetzung der Bionik-Akteure

In Abbildung 6 sind die (nicht-)vorhandenen Verbindungen zwischen den identifizierten Akteuren noch einmal in einer etwas anderen Form dargestellt. Zwar stehen auch hier die beiden Netzwerke im Zentrum der Betrachtung. Allerdings sind in dieser Abbildung nicht nur die Verbindungen zu den Netzwerken, sondern auch die Beziehungen der einzelnen Akteure untereinander dargestellt. Dabei wurden insgesamt drei Kategorien der Intensität in der Beziehung zwischen den Akteuren unterschieden, welche auch durch eine gestufte Strichstärke in Abbildung 6 dargestellt sind: *Kontakt* (schmalste Stärke), *Kooperation* (mittlere Stärke) und *Mitgliedschaft* (größte Stärke). In die Kategorie *Kontakt* fällt beispielsweise der Fall, dass ein Institut eine Konferenz zum Thema Bionik ausgerichtet und einen Vertreter eines Unternehmens, das zur Bionik forscht, als Vortragenden eingeladen hat. Unter *Mitgliedschaft* fallen beispielsweise die Standorte des „BioKoN“ und Träger des „KN Biomimetik“.

Zentrale Rolle des BioKoN

In Abbildung 6 ist deutlich zu erkennen, welch zentrale Rolle das „BioKoN“ einnimmt. Auch das „KN Biomimetik“ ist klar als ein wichtiges Unterzentrum der Bionik (im engen Sinne) in Deutschland erkennbar. Des Weiteren zeigt die Abbildung aber auch, dass zwar sehr viele Akteure enge Verbindungen zu einem der beiden Netzwerke pflegen, untereinander aber nur schwach miteinander verbunden sind. Viele der identifizierten Akteure weisen keinerlei Beziehungen zu weiteren Akteuren auf und sind ausschließlich mit dem „BioKoN“ oder dem „KN Biomimetik“ vernetzt. Dann gibt es allerdings auch eine Reihe von Akteuren, die tlw. vier und mehr Verbindungen zu anderen Bionik-Akteuren aufweisen. Hierzu zählen insbesondere die Universitäten Saarbrücken, Freiburg, Tübingen, Bremen, Bonn, TU Berlin, TU Dresden, TU Darmstadt und TU Ilmenau und die Hochschule Bremen. Bei den außeruniversitären Forschungsinstituten sind das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen, das Max-Planck-Institut für Metallforschung (MPI MF) in Stuttgart, das Alfred Wegener Institut (AWI) in Bremen und das Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf besonders stark vernetzt. Seitens der Unternehmen stechen besonders hervor DaimlerChrysler und die Dr. Mirtsch GmbH. Wie es scheint, gibt es einen recht kleinen Kreis stark vernetzter Akteure, der hauptsächlich von Hochschulen dominiert wird, und einen großen Kreis von Akteuren, die nur mit dem „BioKoN“ oder dem „KN Biomimetik“ in Verbindung stehen. Schließlich zeigt sich auch deutlich, dass eine ganze

Reihe von Institutionen – fast ausschließlich Unternehmen – in überhaupt gar keiner Weise (sichtbar) vernetzt sind. Diese sind am linken und unteren Rand der Abbildung 6 dargestellt.

Insgesamt ergibt sich damit aus der Betrachtung der Verbindungen zwischen den identifizierten Akteuren, dass Bionik(-F&E) zur Zeit in Deutschland nur teilweise vernetzt stattfindet. Zu großen Teilen wird Bionik von unterschiedlichen Akteuren unabhängig voneinander betrieben.

4.5 Analyse und Beschreibung der deutschen F&E-Landschaft durch Literaturrecherchen

Auswertung von Literaturdatenbanken

Neben dem Ansatz, wie er im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, ist im Rahmen der vorliegenden Studie ein zweiter grundlegender Ansatz zur Analyse der deutschen F&E-Landschaft hinsichtlich Bionik verfolgt worden. Dieser besteht im Wesentlichen darin, dass in einer der größten und von ihrer Bedeutung für die internationale Wissenschaft her wichtigsten Artikeldatenbank gezielt nach bestimmten Begriffen gesucht worden ist, die mit Bionik im Zusammenhang stehen. Dabei wurde die Suche auf den geografischen Raum Deutschland und auf den Zeitraum 1990 bis 2005 eingeschränkt. Die Ergebnisse der Suche konnten dann nach Institutionen, die jeweils die gefundenen Artikel veröffentlicht hatten, gelistet und bspw. nach der Häufigkeit der Veröffentlichungen sortiert werden. So ergab sich ein Bild darüber, wie aktiv deutsche Institutionen unter bestimmten Begriffen aus der Bionik publizieren. Unter der Annahme, dass die Intensität des Publizierens (in etwa) proportional ist mit den tatsächlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, konnte so die deutsche Bionik-F&E-Landschaft abgebildet werden. Schließlich wurde auch die Möglichkeit genutzt, die Treffer der Suche in der Artikeldatenbank so anzeigen zu lassen, dass deutlich wurde, welche Institution wie häufig mit welcher anderen Institution gemeinsam publiziert hat. Unter der Annahme, dass gemeinsame F&E-Aktivitäten (in etwa) proportional sind mit der Häufigkeit gemeinsamer Veröffentlichungen, konnte so auch dargestellt werden, ob und wie stark die Akteure der Bionik in Deutschland miteinander vernetzt sind.

Die Artikeldatenbanken, in welchen die Literaturrecherchen zur deutschen Bionik-F&E durchgeführt worden sind, sind in den „Web of Science Databases (WSD)“ zusammengefasst und werden von Thomson Scientific (früheres Institute for Scientific Information) erstellt

Die »Web-of-Science«-Datenbanken

und unterhalten. Die WSD bestehen aus insgesamt fünf Datenbanken, in denen auch separat gesucht werden kann. Sie umfassen dabei insgesamt rund 8.800 wissenschaftliche Zeitschriften und Journale, die im Wochenturnus ausgewertet werden.[83] Die Autoren der Datenbank versuchen, eine umfangreiche aber nicht allumfassende Datenbank für die wissenschaftliche Zeitschriftenliteratur zu erstellen. Sie begründen dies damit, dass die Analysen der Zitationshäufigkeiten zeigten, dass rund 2.000 Zeitschriften 95% der zitierten Artikel publizierten.[84] Daher sehen die WSD-Betreiber ihre Aufgabe darin, eine Datenbank mit den Kernzeitschriften zu erstellen, welche die wesentlichen Forschungsergebnisse dokumentieren.[85]

Thomson Scientific erstellt auf der Grundlage der WSD auch die so genannten „Journals' Citiation Reports". In diesen werden die Zeitschriften nach der Zitierhäufigkeit ihrer Artikel analysiert und dargestellt. Eine hohe Zitierhäufigkeit einer Zeitschrift erhöht dabei ihr Ansehen in der wissenschaftlichen Community, da man davon ausgeht, dass eine viel zitierte Publikation hohe wissenschaftliche Relevanz habe. Auf diese Weise beeinflussen die Citation Reports das Verhalten der Wissenschaftler, da diese ihre Artikeln in den meist zitierten Zeitschriften zu veröffentlichen suchen. Daher darf angenommen werden, dass die WSD den Mainstream der Forschung abzubilden durchaus in der Lage sind.

Suchbegriffe zu »Bionik im engen Sinne«

Um die Forschungslandschaft zu „Bionik im engen Sinne" abzubilden, wurde in den WSD eine Suche nach den Begriffen „*bionic**" und „*biomim**" durchgeführt.[86] Gesucht wurde dabei in den Titeln, den

---

83 Die einzelnen Datenbanken sind wie folgt aufgebaut:

· *Science Citation Index Expanded*™
Diese Datenbank enthält rund 5.900 Zeitschriften aus 150 naturwissenschaftlichen Disziplinen. Für den Zeitraum ab 1991 verzeichnet die Datenbank auch Abstracts von rund 70% aller in der Datenbank registrierten Artikel.

· *Social Sciences Citation Index*®
Diese Datenbank führt mehr als 1.700 Zeitschriften aus 50 sozialwissenschaftlichen Disziplinen vollständig. Hinzu kommen noch einzelne Einträge aus 3.300 naturwissenschaftlichen Zeitschriften. Die Abstracts von rund 60% aller in der Datenbank vorhandenen Artikel werden seit 1992 verzeichnet.

· *Arts & Humanities Citation Index*®
Diese Datenbank führt insgesamt 1.144 geisteswissenschaftliche Zeitschriften.

· *Index Chemicus*®
Die Datenbank verzeichnet ausschließlich chemische Verbindungen.

· *Current Chemical Reactions*®
Diese Datenbank beinhaltet die Dokumentation chemischer Reaktionen.

Die WSD erlauben eine Analyse der verzeichneten Artikel unter anderem nach Autoren, Autoren-Adressen, Sprache, Publikationsjahr, Quelle und Disziplin.

84 Garfield, E., The Significant Scientific Literature Appears in a Small Core of Journals. The Scientist V10 (17), Sept. 2, 1996.

85 Siehe Internetseiten von Thomson Scientific unter:
http://scientific.thomson.com/free/essays/selectionofmaterial/journalselection/ (Zugriff: Januar 2007).

Keywords und in den Abstracts (soweit vorhanden) der Artikel aller Datenbanken der WSD. Als boolsche Verknüpfung wurde ODER gewählt. In der Regel nutzen die Autoren ausschließlich einen der beiden Begriffe – nur äußerst selten werden beide Begriffe in ein und derselben Veröffentlichung gebraucht.

Englisch- und deutschsprachige Artikel

Prinzipiell sind durch diese Suchwort-Auswahl zumindest auch der deutsche Begriff „Biomimetik" und dessen Abwandlungen („biomimetisch", etc.) abgedeckt. Allerdings verzeichnen die WSD kaum Beiträge in deutscher Sprache, da die meisten international bedeutenden Zeitschriften – und nur diese werden ja in den WSD ausgewertet – englischsprachig sind. Insofern ist es auch vernachlässigbar, dass als zweites Suchwort „bionic*"[87] gewählt worden ist und somit nicht nach dem deutschen Begriff „Bionik" und seinen Abwandlungen („bionisch", etc.) gesucht wurde: Eine separate Suche nach „Bionik" ergab im genannten Zeitraum lediglich einen einzigen Treffer, eine Suche nach „bionisch*" gar keinen, so dass die gewählte Kombination von „bionic*" und „biomim*" für die hier verfolgten Zwecke sinnvoll und richtig ist.

Suchbegriffe zum »Lernen von der Natur«

Bei der Analyse der Forschungslandschaft zu „Lernen von der Natur" ist in den Datenbanken der WSD (siehe oben) eine Suche durchgeführt worden, die neben den Begriffen „bionic*" und „biomim*" auch die alternativen, mit Bionik verbundenen Begriffe „self repair*", „self heal*", „biolog* inspir*", „bioinspir*" und „self organi*" mit einschloss.[88] Alle anderen Parameter und auch das Vorgehen sind in selber Weise durchgeführt worden wie bei der Suche zur Bionik im engen Sinne.

Bionik im engen Sinne

Bei der Analyse der Forschungslandschaft zu „Bionik im engen Sinne" werden solche Artikel identifiziert, denen Autoren ihre Arbeiten explizit einem der beiden Begriffe zuordnen. Im Rahmen der Fallstudien (vgl. Kapitel 3.2) und auch im Zuge von Experteninterviews

› s. Kapitel 3.2

86 Der Asterisk („*") bei „bionic*" und „biomim*" steht dabei stellvertretend für eine beliebige Buchstaben- oder Zeichenfolge, d. h., mit dieser Suche konnten alle Artikel gefunden werden, in denen im Titel, im Abstract oder in den Keywords die Begriffe „bionic", „bionics", „bionical", *oder* „bionically" bzw. „biomimetic", „biomimetics", „biomimetical" oder „biomimetically" auftauchen.

87 Die Suchwortkonfiguration „bionic*" anstelle von „bioni*" wurde notwendig, da bei einer Probesuche nach „bioni*" überwiegend solche Artikel als Treffer angezeigt worden sind, die sich mit Bio-Nickel („bio-Ni) befassen und eindeutig nichts mit Bionik zu tun hatten.

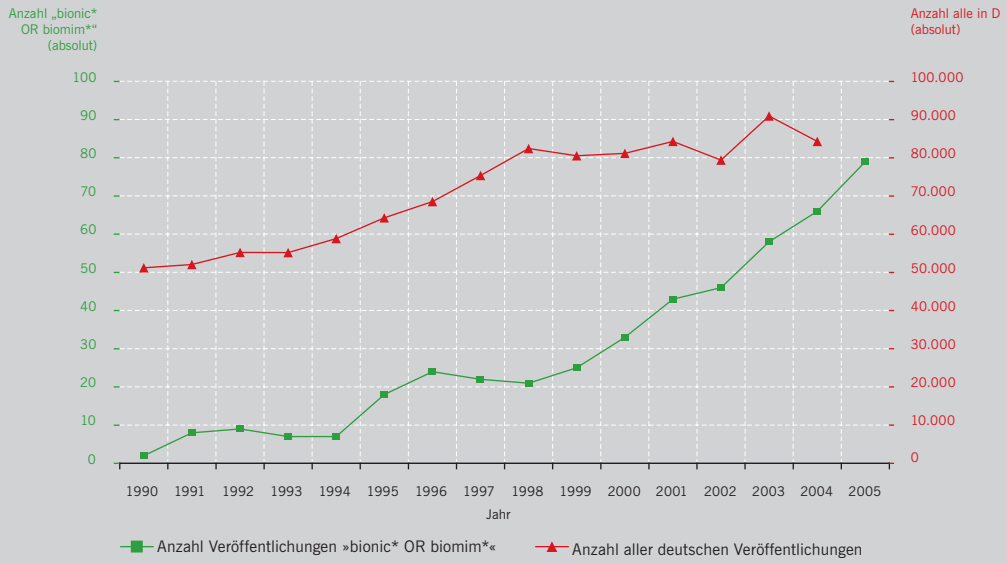
88 Es ist zwar bereits mehrfach darauf hingewiesen worden, dass sehr häufig auch Begriffe wie „intelligent" oder „smart" mit dem Sinn nach bionischen Ansätzen in Verbindung stehen. Aus nahe liegenden Gründen gelangt man jedoch bei einer Recherche unter Benutzung von „intelligent" oder „smart" zu keinen sinnvollen Ergebnissen, so dass diese Begriffe nicht mit einbezogen werden konnten.

Verwendung der Begriffe »Bionik« und »Biomimetik«

konnte jedoch festgestellt werden, dass in vielen Fällen F&E betrieben wird, welche der Idee nach sehr wohl als Bionik bezeichnet werden könnte, ohne dass sich aber die Wissenschaftler notwendigerweise der Begriffe „Bionik“ oder „Biomimetik“ bedienen würden. Stattdessen werden alternative Begriffe verwendet, die jedoch im Kern einen durchaus bionischen Sinn haben (bspw. „Selbstheilung“) und auch zur Beschreibung ihrem Wesen nach „bionischer“ Ansätze und Konzepte benutzt werden. Daher ist neben einer Literaturrecherche zu „Bionik im engen Sinne“, eine weitere Recherche mit alternativen Begriffen durchgeführt worden, die allesamt einen Bezug zum „Lernen von der Natur“ aufweisen.[89] Die Ergebnisse dieser Suchläufe sind im nächsten Unterkapitel dargestellt.

Wie die Abbildung 7 und die Abbildung 8 zeigen, haben in dem untersuchten Zeitraum die Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD zu den Begriffen „bionic*“ oder „biomim*“ nicht nur absolut, sondern

Abbildung 7 — Anzahl der Veröffentlichungen aus Deutschland zu den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« und Anzahl aller Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD von 1990-2005[90]

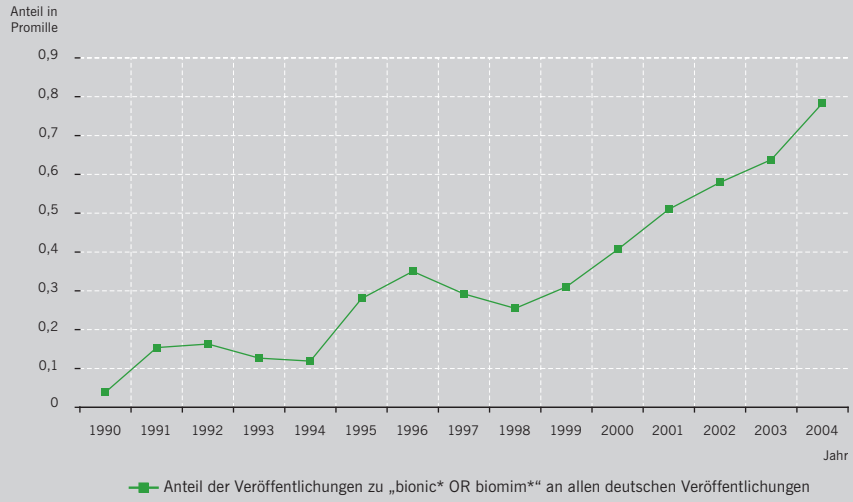


[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

89 Zur Vorgehensweise der Unterscheidung der Kategorien „Bionik im engen Sinne“ und „Lernen von der Natur“ siehe insbesondere auch die Ausführungen am Beginn des Kapitels 3.

90 Für die Reihe „alle Veröffentlichungen aus D“ konnte für das Jahr 2005 keine Angabe gemacht werden, da in diesem Jahr die Veröffentlichungen über 100.000 Stück lag und von der Datenbank nicht mehr genau angegeben werden kann.

Abbildung 8 — Anteil der Veröffentlichungen aus Deutschland zu den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« an allen Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD von 1990-2004



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Veröffentlichungen zu »Bionik« und »Biomimetik« haben stark zugenommen

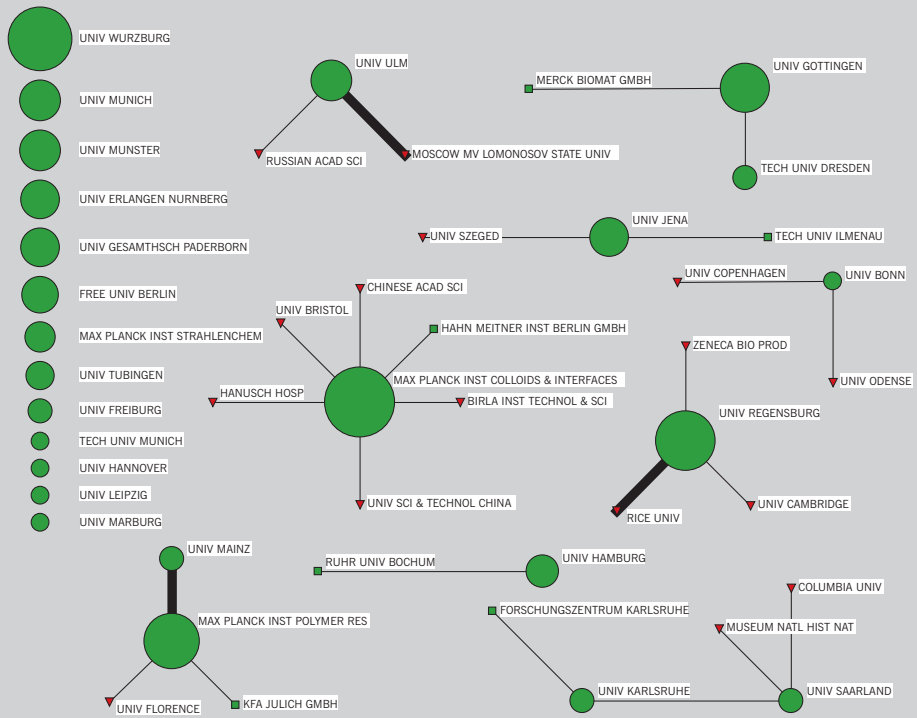
auch in Relation zur Gesamtzahl aller Veröffentlichungen aus Deutschland stark zugenommen. Der Anteil von Veröffentlichungen, denen eine enge Auffassung von Bionik (wie oben beschrieben) zugrunde liegt, hat sich von 1990 bis 2004 um eine Größenordnung erhöht. Eine hohe Konjunktur von wissenschaftlichen Arbeiten zur Bionik bzw. Biomimetik ist damit insbesondere für den Zeitraum ab 1999 klar belegt.

Die Suche nach Artikeln, welche von deutschen Institutionen unter den Begriffen „bionic*“ oder „biomim*“ zwischen 1990 und 2005 in den von den WSD ausgewerteten Zeitschriften veröffentlicht worden sind, ergab insgesamt 468 Treffer.

Institutionen zu »Bionik« und »Biomimetik« in Deutschland

Da eine Darstellung aller Institutionen, die über die eben beschriebene Suche gefunden worden sind, unübersichtlich und wenig zielführend wäre (es sind insgesamt über 100), sind in Abbildung 9 zunächst nur die 25 meist publizierenden Institutionen aus Deutschland dargestellt (Kreise). Die Größe der einzelnen Kreise ist dabei proportional zur Summe der im Suchzeitraum veröffentlichten Artikel (die Abstufung erfolgt in Viererschritten, angefangen bei 2-5; Institutionen, die nur einen einzigen Artikel veröffentlicht haben, sind nicht berücksichtigt worden). Führend mit insgesamt 25 Publikationen ist dabei das Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm (bei Potsdam), gefolgt von den Universitäten Würzburg (23) und

Abbildung 9 — Die 25 unter den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« meist publizierenden deutschen Institutionen inkl. der in- und ausländischen Institutionen, mit denen jeweils gemeinsam zu den genannten Begriffen veröffentlicht worden ist (Veröffentlichungszeitraum: 1990-2005)



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Regensburg (21) (eine Liste der ausgeschriebenen Namen der in der Abbildung zwecks Übersichtlichkeit nur abgekürzt dargestellten Institutionen befindet sich im Anhang).

Kooperationen

Da im vorliegenden Kapitel die Bionik-Akteure in Deutschland nicht nur identifiziert und beschrieben, sondern auch deren Beziehungen zueinander analysiert werden sollen, sind in Abbildung 9 auch diejenigen Institutionen dargestellt, mit denen die 25 meist publizierenden deutschen Institutionen unter den Begriffen „bionic*“ oder „biomim*“ im genannten Zeitraum gemeinsam Artikel veröffentlicht haben, was durch die Verbindungsstriche symbolisiert wird. Dabei sind sowohl deutsche (grüne Quadrate) als auch nicht-deutsche (rote Dreiecke) Institutionen berücksichtigt worden. Die Häufigkeit der gemeinsamen Publikationen ist proportional zur gewählten Strichstärke, wobei aus

Gründen der Übersichtlichkeit, aber auch der Aussagefähigkeit nur diejenigen Institutionen Berücksichtigung fanden, die mindestens zwei gemeinsame Veröffentlichungen aufzuweisen haben.

Nur wenige gemeinsame Veröffentlichungen

Die Abbildung 9 zeigt, dass etwas mehr als die Hälfte (13) der meist publizierenden deutschen Einrichtungen mit keiner Institution zwei oder mehr Artikel gemeinsam veröffentlicht haben. Etwas weniger als die Hälfte der Institutionen (11) hat tlw. mit mehreren Institutionen zweimal und häufiger gemeinsam publiziert. Allerdings wird auch bei diesen Institutionen deutlich, dass sie den größten Teil eigenständig veröffentlichen und nur selten gemeinsam mit anderen. Interessanterweise überwiegen bei den als Ko-Autoren auftretenden Institutionen solche aus dem Ausland. Schließlich stechen lediglich drei engere Kooperationen hervor: die zwischen der Universität Regensburg und der Rice Universität in Houston, Texas (USA), die zwischen dem MPI für Polymerforschung und der Universität Mainz, und die zwischen der Universität Ulm und der Lomonossow Universität in Moskau (Russland).

Diskrepanz zwischen Literaturrecherche und Netzwerkanalyse

Die Abbildung 9 macht des Weiteren deutlich, dass sich das Bild der F&E-Akteure insbesondere bezüglich deutscher Hochschulen und außeruniversitärer Forschungseinrichtungen, wie es in den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels 4 beschrieben wird, tlw. unterscheidet von dem Bild, welches sich über die Literaturrecherche ergibt. Die Hochschulen, wie bspw. die RWTH Aachen, die TU Darmstadt, die TU Berlin, die Universitäten in Freiburg, Tübingen, Saarbrücken und Bremen oder die Hochschule Bremen, die in den beiden Netzwerken „BioKoN“ und „KN Biomimetik“ stark vertreten sind und auch von den interviewten Experten als wichtige Bionik-Akteure in Deutschland genannt worden sind, spielen hinsichtlich des Publizierens von Artikeln in international renommierten Fachzeitschriften entweder gar keine oder keine herausragende Rolle. Ähnlich verhält es sich mit außeruniversitären F&E-Einrichtungen, wo lediglich das MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung sowohl über die Netzwerke, Experteninterviews und Konferenzen, als auch über die Literaturrecherchen als bedeutender Bionik-Akteur identifiziert werden konnte. Es scheint also eine Reihe von Akteuren im Bereich deutscher Bionik-F&E zu geben, die zum einen wenig oder keine Berührung mit den etablierten Netzwerkstrukturen haben und zum anderen auch sonst kaum oder gar nicht hinsichtlich ihrer Bionik-Aktivitäten mit anderen Akteuren kooperieren. Eine stichprobenhafte Untersuchung – eine detaillierte Untersuchung wäre aufgrund der vielen Hundert Publikationen hier nicht leistbar gewesen – dieser Institutionen hat ergeben, dass über die Literaturrecherche in den WSD insbesondere solche Institutionen hervorstechen, die in den Bereichen Chemie, Biochemie, Biotechno-

logie oder Nanotechnologien aktiv sind. Gerade diese Bereiche sind in der Tat in den Bionik-Netzwerken „BioKoN“ und „KN Biomimetik“ eher unterrepräsentiert, was eine Erklärung für die tlw. Diskrepanz zwischen den Ergebnissen aus den Kapiteln 4.2 bis 4.4 beschriebenen Recherchen auf der einen und den hier dargestellten Literaturrecherchen auf der anderen Seite sein könnte.

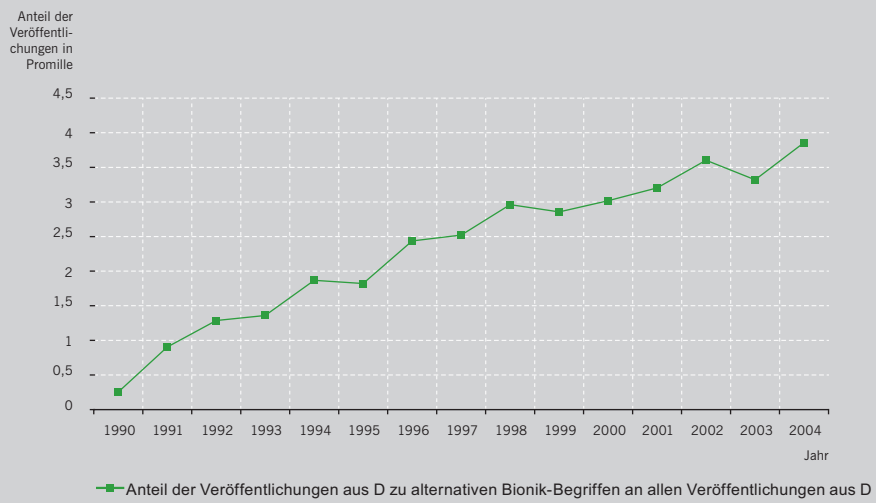
Lernen von der Natur

Analog zu der Literaturrecherche zu Bionik im engen Sinn ist im Rahmen der Untersuchungen zur deutschen F&E-Landschaft Bionik auch eine Suche nach Veröffentlichungen zu „Lernen von der Natur“ durchgeführt worden.

Wie die Abbildung 10 deutlich macht, haben auch die Veröffentlichungen aus Deutschland zu den oben genannten alternativen Bionik-Begriffen in den WSD von 1990 bis 2004 nicht nur absolut, sondern auch im Verhältnis zu allen Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD in diesem Zeitraum stark zugenommen. Bemerkenswert ist auch, dass die Anzahl der Publikationen, die einer weiten Auffassung von Bionik entsprechen, insgesamt etwa fünfmal so groß ist wie die Anzahl der Veröffentlichungen zum engen Bionik-Begriff. Für den Zeitraum 1990-2005 sind insgesamt 3.091 Publikationen zu allen oben

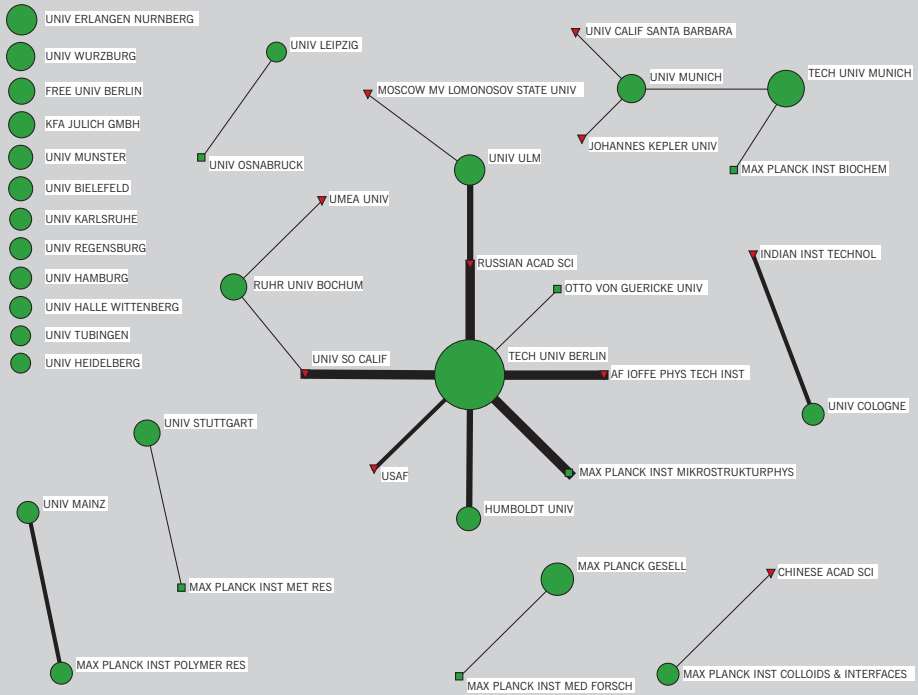
Veröffentlichungen zu »Lernen von der Natur« haben stark zugenommen

Abbildung 10 — Anteil der Veröffentlichungen aus Deutschland zu den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« an allen Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD von 1990-2004



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 11 — Die 25 unter alternativen Bionik-Begriffen meist publizierenden deutschen Institutionen inkl. der in- und ausländischen Institutionen, mit denen jeweils gemeinsam zu den genannten Begriffen veröffentlicht worden ist (Veröffentlichungszeitraum: 1990-2005)



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

genannten Bionik-Begriffen in den WSD verzeichnet, wovon lediglich 468 den Begriffen „bionic*“ und „biomim*“ zuzuordnen sind. Damit wird deutlich, dass der bionische F&E-Ansatz, nämlich das Übertragen biologischer Erkenntnisse in nicht-biologische (meist technische) Kontexte weiter verbreitet ist als die Nutzung der Begriffe „Bionik“ und „Biomimetik“.

Institutionen zu »Lernen von der Natur« in Deutschland

Ebenfalls analog zu der Darstellung der zum engen Bionik-Begriff veröffentlichenden Institutionen aus Deutschland in der Abbildung 9, sind in Abbildung 11 einmal diejenigen 25 Institutionen aus Deutschland dargestellt, die unter den alternativen Bionik-Begriffen, wie sie eben beschrieben worden sind (siehe oben), in den WSD von 1990-2005 am häufigsten publiziert haben. Auch sind wieder diejenigen Einrichtungen aus dem In- und Ausland aufgeführt, mit denen die vorgenannten 25 Top-Institutionen gemeinsam unter den genann-

ten Begriffen veröffentlicht haben (die grafische Darstellung ist ansonsten analog zur Abbildung 9).

Bedeutung des Begriffs »Selbstorganisation«

Die Abbildung 11 zeichnet ein wieder etwas anderes Bild der deutschen F&E-Landschaft hinsichtlich Bionik, als es die vorherigen Ausführungen und Darstellungen haben entstehen lassen. Besonders auffällig ist hier der große Knotenpunkt der TU Berlin in der Mitte der Abbildung. Die Veröffentlichungen der TU Berlin wurden daher noch einmal genauer betrachtet, wobei sich herausstellte, dass 217 der insgesamt 227 Veröffentlichungen dem Stichwort „self organi*" zuzuordnen sind. Von diesen sind wiederum 172 der Disziplin Physik im weitesten Sinne, d. h. einschließlich physikalischer Chemie zuzuordnen. Eine Untersuchung, ob speziell ein Institut der Universität in diesem Bereich besonders aktiv ist, ergab, dass mindestens 168 der Publikationen am Institut für Festkörperphysik und/oder unter Beteiligung des Institutsleiters Prof. Bimberg entstanden sind. An diesem Institut wird intensiv zu Nanomaterialien und Nanophysik geforscht, wobei Prozesse und Strukturen der Selbstorganisation eine große Rolle spielen. Hier zeigt sich also wiederholt, dass Bereiche, die insbesondere durch die Bionik-Netzwerke „BioKoN" und „KN Biomimetik" wenig oder gar nicht abgedeckt werden, sehr publikationsstark sind. Interessant ist hinsichtlich der zentralen Stellung der TU Berlin bezüglich der Veröffentlichungen in den WSD, dass sich unter den 227 Treffern kaum welche aus dem Institut von Herrn Prof. Rechenberg finden, welches jedoch gerade bei den Netzwerken eine bedeutende Rolle spielt.

Wenige gemeinsame Veröffentlichungen

Ähnlich wie in der Abbildung 9 geht auch aus Abbildung 11 hervor, dass ca. die Hälfte der identifizierten Institutionen ausschließlich eigenständig, d. h., ohne Kooperationen mit anderen Institutionen einzugehen, zu den alternativen Bionik-Begriffen publiziert hat. Diejenigen Institutionen, die gemeinsam mit anderen veröffentlichten, taten dies in den meisten Fällen nur mit einer einzigen Partnereinrichtung und zudem gingen aus diesen Kooperationen nur relativ wenige Artikel hervor. Der Vernetzungsgrad mit Bezug auf Veröffentlichungen unter einem weiten Bionik-Begriff („Lernen von der Natur") kann daher als sehr gering eingestuft werden.

Diskrepanz zwischen Literaturreche und Netzwerkanalyse

Generell fällt darüber hinaus auf, dass, wenn man innerhalb der 3.091 Veröffentlichungen zum weiten Bionik-Begriff nach denjenigen Akteuren sucht, die in Deutschland zum engen Kern der expliziten Bionik-Community (vgl. Kapitel 4.2) zählen, diese kaum oder gar nicht vertreten sind. Von den universitären und außeruniversitären Instituten, die im „BioKoN" Mitglied sind, finden sich einige weder in der Abbildung 9 noch in der Abbildung 11; die meisten anderen bewegen

sich eher im Mittelfeld. Eine Ausnahme bildet die TU Berlin, jedoch wurde bereits erläutert, dass deren große Zahl an Veröffentlichungen vor allem dem Institut für Festkörperphysik und nicht den „Bionikern" um Prof. Rechenberg zuzuordnen ist.

Eine gezielte Suche nach bekannten und sehr aktiven Mitgliedern der expliziten deutschen Bionik-Community erzielte dagegen einige, wenn auch nicht viele Treffer. Die Eingabe der Suchwörter „Lotus" (*topic*) und „Barthlott" (*author*) führte bspw. zu (nur) sechs Treffern, die jedoch sämtlich nicht durch die Suche nach „bionic*" oder „biomim*" erfasst worden sind. Eine weitere Suche nach „Bannasch R" (*author*) ergab zehn Treffer, die dem Thema nach zwar alle mit Bionik in Verbindung stehen, jedoch nur ein einziger dieser Artikel kann über die Suche nach „bionic*" oder „biomim*" identifiziert werden. Hier zeigt sich, dass selbst diejenigen, die sich selbst eindeutig der Bionik-Community in Deutschland zuordnen, wenig unter den einschlägigen Bionik-Begriffen publizieren. Diese Tatsache könnte als Hinweis darauf interpretiert werden, dass die Bionik-F&E (in Deutschland) nach wie vor sehr stark in den konventionellen Disziplinen und damit auch in deren Sprache verhaftet ist. Die in der Bionik involvierten Wissenschaftler und Entwickler gehen offenbar noch nicht unter der „Flagge" Bionik/Biomimetik an die (Fach-)Öffentlichkeit und können sich daher auch noch nicht unter einer solchen „Flagge" versammeln.

Kaum gemeinsame Veröffentlichungen mit ausländischen Bionik-Institutionen

Auch die ausländischen Kooperationspartner der Bionik-Kompetenznetze, wie bspw. die University of Reading (UK), Träger des Bionik-Netzwerks „BIONIS",[91] zählen nicht zu den Ko-Autoren der 25 am meisten unter den alternativen Bionik-Begriffen in Deutschland publizierenden Institutionen. Dies lässt entweder auf fehlende Anwendung der einschlägigen Begriffe oder auf nur wenige gemeinsame Veröffentlichungen schließen. Eine beispielhafte Überprüfung für die Universitäten in Reading und Bath (beide UK) ergab, dass die Anzahl der gemeinsamen Publikationen mit deutschen Institutionen zum Thema Bionik sehr klein ist. Bei Anwendung aller Suchbegriffe und „Teilnahme deutscher Autoren" als Bedingung fanden sich in der Datenbank für die University of Bath nur vier Texte, für die University of Reading gar keine. Bei Verzicht auf die Bedingung der Teilnahme deutscher Autoren ergab die Suche hingegen 57 Treffer für Bath (davon allein 31 für „biomimeti*") und 35 für Reading (davon 10 für „biomimeti*"). Dies lässt den Schluss zu, dass die Kooperationen, zumin-

91 siehe Internetseiten des BIONIS-Netzwerks unter http://www.extra.rdg.ac.uk/eng/BIONIS/ (Zugriff: Dezember 2006)

dest was das gemeinsame Publizieren in international renommierten Fachzeitschriften angeht, zwischen der deutschen und der britischen Bionik-Community eher wenig ausgeprägt sind.

Insgesamt erwecken die durchgeführten Untersuchungen den Eindruck, dass es neben den in der expliziten Bionik-Community Deutschlands stark öffentlich präsenten Akteuren offenbar noch zahlreiche weitere Einrichtungen gibt, die zu Bionik oder verwandten Themen forschen, ohne dass diese damit jedoch vordergründig unter dem „Label“ Bionik bzw. Biomimetik firmieren.

4.6 Internationale F&E-Landschaft

Für die Analyse der internationalen F&E-Landschaft mit Blick auf „Bionik im engen Sinne“ und auf den Ansatz eines „Lernens von der Natur“[92] wurde die Analyse der Publikationen im „Web of Science“[93] um eine Patentanalyse ergänzt. Letztere wurde durchgeführt vom Patentinformationszentrum Paton der Universität Ilmenau. Um den internationalen Vergleich übersichtlich zu halten, wurde eine vertiefende Betrachtung auf die Länder USA, Japan, Deutschland, Frankreich, England und China beschränkt.

Patent- und Literaturanalyse jeweils zu »Bionik im engen Sinn« und zu »Lernen von der Natur«

Recherche in den »Web-of-Science«-Datenbanken

Durchsucht wurde zunächst das „Web of Science“ wieder einerseits nach den Begriffen „bionic*“ und „biomim*“ (Bionik i. e. S.) sowie zusätzlich nach den Begriffen „biolog*-inspir*“, „bioinspir*“ self-organi*“, „self-heal*“ und „self-repair*“ („Lernen von der Natur“) im Zeitraum von 1990-2005.[94] Die absolute Anzahl an Fachpublikationen zu „bioni*“ und „biomim*“ nahm im Untersuchungszeitraum auch international stetig zu (vgl. Abbildung 12).

USA bei den Literaturveröffentlichungen Spitzenreiter

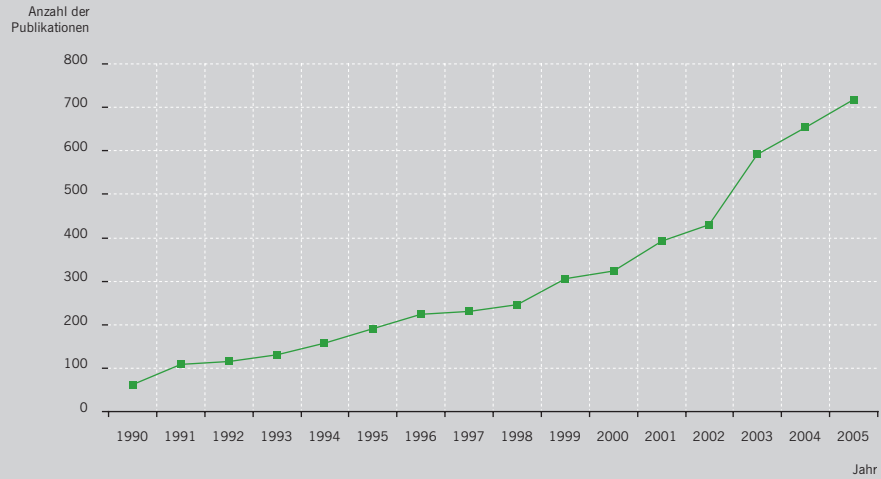
Erfasst wurden weltweit 4.878 Veröffentlichungen. Davon entfielen mit 3.728 ca. 76% auf die vertieft untersuchten Länder. In den USA wurden mit 1.586 Publikationen die mit Abstand meisten Texte veröffentlicht. Japan (593), Deutschland (467), China (370), England (357) und Frankreich (355) zählen ebenfalls zu den Top Ten. Den Anteil an den weltweiten Veröffentlichungen verdeutlicht die folgende Graphik (Abbildung 13).

92 Zur Vorgehensweise der Unterscheidung der Kategorien „Bionik im engen Sinne“ und „Lernen von der Natur“ siehe insbesondere auch die Ausführungen am Beginn des Kapitels 4.1.

93 Zu den Datenbanken des „Web of Science“ siehe die Erläuterungen im Kapitels 4.5.

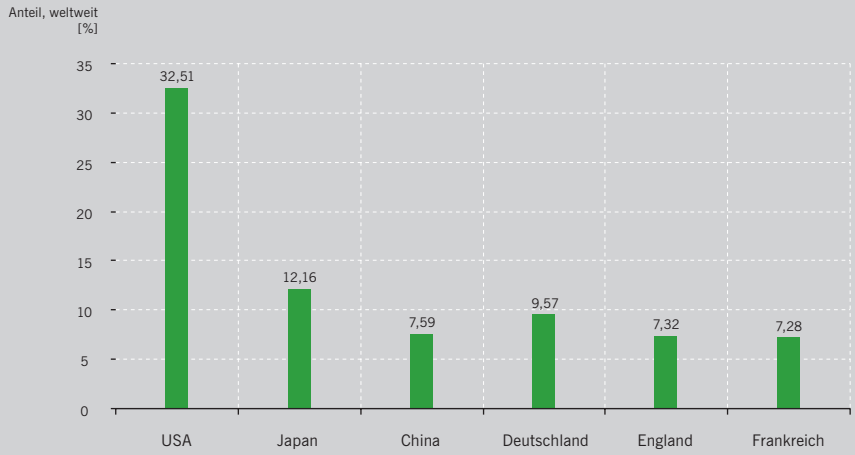
94 Näheres zu Methoden und den Datenbanken vergleiche Kapitel 4.5.

Abbildung 12 — weltweite Entwicklung der jährlichen Publikationen zu Bionik im engen Sinne (»bionic*« und »biomim*«) in der Web of Science Datenbank



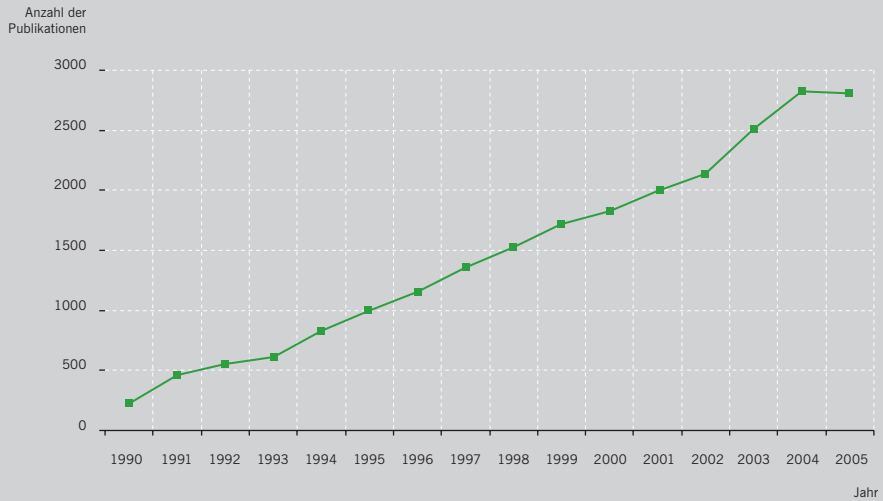
[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 13 — Länderverteilung der Literaturveröffentlichungen für den Zeitraum 1995 bis 2005 zu Bionik im engen Sinne (»bionic*« und »biomim*«)



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 14 — weltweite Entwicklung der jährlichen Publikationen zum weiten Bionikbegriff (»bionic*«, »biomim*«, »biolog*-insp*«, »bio(-)insp*«, »self-orga*«, »self-repair*« und »self-heal*«) in der Web of Science Datenbank



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Die Dynamik bei den Veröffentlichungen zum Thema „Lernen von der Natur“ ist für den betrachteten Zeitraum durchaus vergleichbar mit derjenigen zum engen Bionikbegriff (vgl. Abbildung 14). Die jährliche Publikationsmenge hat sich seit 1990 mehr als verzehnfacht.

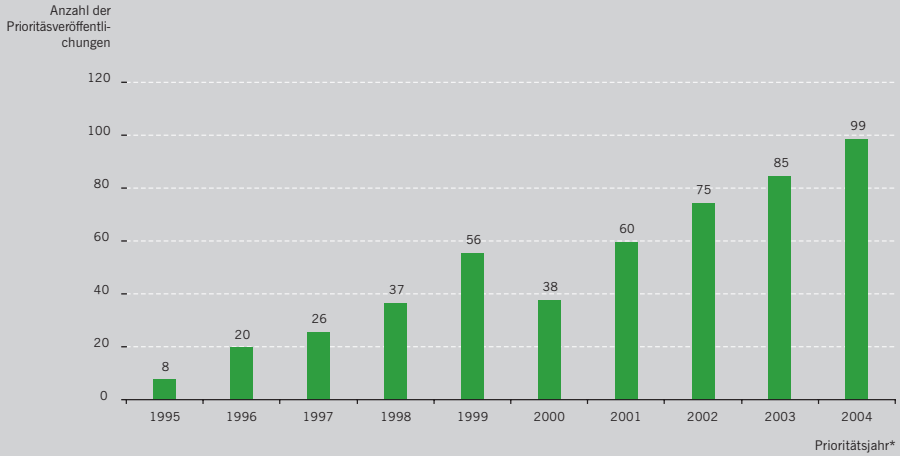
Veröffentlichungen der Länder USA, China, Frankreich, England, Japan und Deutschland

Bei der Verteilung auf die Länder gibt es jedoch leichte Unterschiede. Deutschland schiebt sich auf den zweiten Platz und China fällt noch mehr zurück. Erfasst wurden 23.535 Veröffentlichungen, davon entfielen 17.024 Veröffentlichungen auf die sechs Länder USA (6.547 entspr. 27,82%), Deutschland (3.089 entspr. 13,13%), Japan (2.642 entspr. 11,23%), Frankreich (1.776 entspr. 7,55%), England (1.673 entspr. 7,11%) und China (1.297 entspr. 5,51%). Auf die drei Länder mit den meisten Veröffentlichungen (USA, Deutschland und Japan) entfallen mehr als die Hälfte aller weltweit veröffentlichten Texte zu den erweiterten Suchbegriffen.

Ergebnisse der Patentanalysen

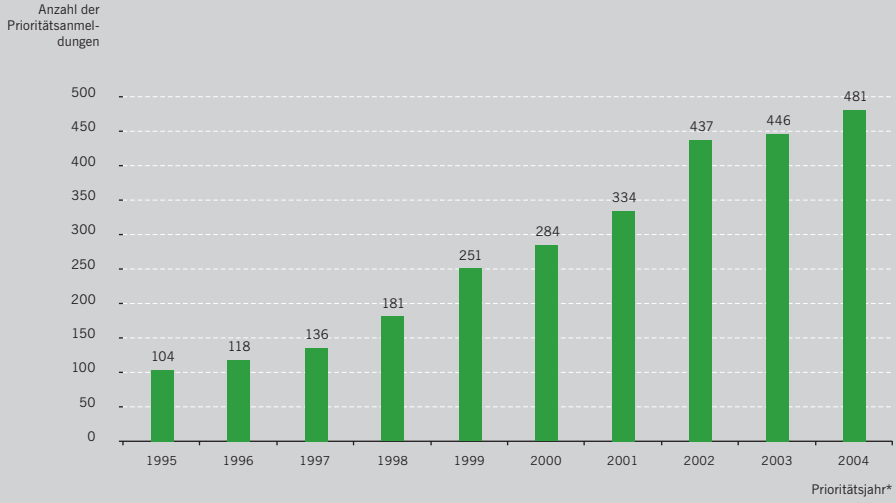
Parallel zu den Literaturrecherchen in den „Web of Science“ Datenbanken sind zur Analyse der internationalen F&E-Landschaft im Bereich Bionik auch Patentanalysen vorgenommen worden. Die Patentanalysen erfolgten dabei für den Zeitraum ab 1995 mit den Suchbegriffen „bionic*“, „biomim*“ und „bio(-)inspir*“[95] und zeigen einen ähnlichen Trend wie die Ergebnisse der Literaturrecherchen (vgl. Abbildung 15). Insgesamt konnten für den Zeitraum 1995

Abbildung 15 — weltweite Entwicklung der jährlichen Patentveröffentlichungen zu Bionik im engen Sinne (»bionic*«, »biomim*« und »bio(-)insp*«)



[Quelle: Paton Patentzentrum Thüringen GmbH — Weltdatenbank WPIDS (Letztes Update 22.03.2007) — * Zwischen Anmeldung und Veröffentlichung eines Patents liegen durchschnittlich 18 Monate!]

Abbildung 16 — weltweite Entwicklung der jährlichen Patentveröffentlichungen zum weiten Bionikbegriff (»bionic*«, »biomim*«, »bio(-)insp*«, »self-orga*«, »self-repair*« und »self-heal*«)



[Quelle: Paton Patentzentrum Thüringen GmbH — Weltdatenbank WPIDS (Letztes Update 22.03.2007) — * Zwischen Anmeldung und Veröffentlichung eines Patents liegen durchschnittlich 18 Monate!]

bis 2004 weltweit 504 Patentveröffentlichungen gefunden werden, welche die Begriffe „bionic*“, „biomim*“ und/oder „bio(-)insp*“ enthielten, wobei sich die Zahl der jährlichen Veröffentlichungen von 8 (1995) auf 99 (2004) erhöht und damit ebenfalls mehr als verzehnfacht hat.

Steigende Anzahl von Patenten zu »Bionik« und »Biomimetik« weltweit

Ein ganz ähnliches Bild ergab sich im Rahmen der Patentrecherche bei der Suche nach dem erweiterten Bionikbegriff („Lernen von der Natur“) (vgl. Abbildung 16). Zusätzlich zu den Begriffen zu Bionik im engen Sinne sind hier die Begriffe „self-organi*“, „self-heal*“ und „self-repair*“ mit einbezogen worden. Insgesamt hat sich dadurch die Trefferzahl für den Zeitraum 1995 bis 2004 auf 2.772 erhöht, wobei sich die jährliche Veröffentlichungsanzahl allerdings von 104 (1995) auf 481 (2004) „nur“ knapp verfünffacht hat.

Die Verteilung der Patentanmeldungen auf Länder und Regionen unterscheidet sich jedoch signifikant von derjenigen der Literaturveröffentlichungen (vgl. Abbildung 17 in Verbindung mit Abbildung 13).

Spitzenreiter USA und China

Die meisten Patente werden demnach in China angemeldet, dicht gefolgt von den USA. Eine zweite Gruppe bilden Japan und Deutschland, die dritte Großbritannien und Frankreich.[96]

Wenn man nach dem weiten Bionikbegriff (mit den erweiterten Suchbegriffen) in den Patenten recherchiert, rücken die USA allerdings wieder deutlich an die Spitze (1.055 Patentanmeldungen), mit Abstand gefolgt von Japan (764) und mit weiterem Abstand von China (470) und Deutschland (311) (vgl. Abbildung 18).

Disziplinäre Verteilung der Literaturveröffentlichungen

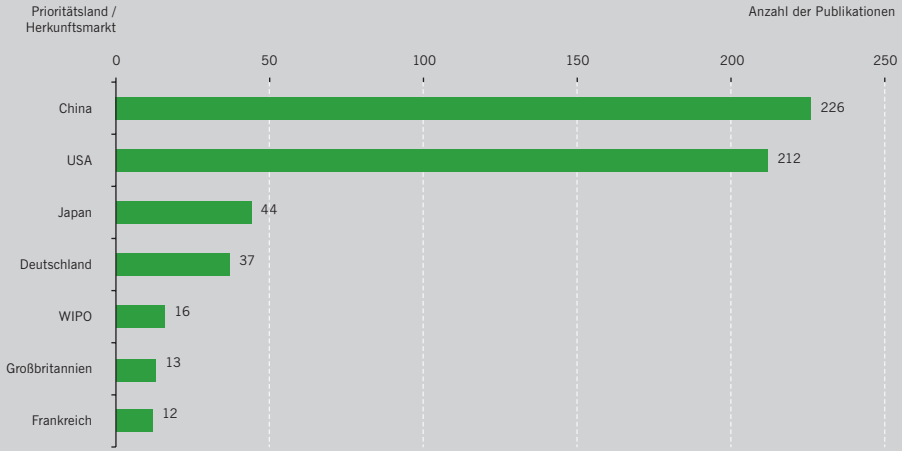
Die Abbildung 19 gibt nun einen Überblick darüber, welchen Bereichen die Veröffentlichungen in den „Web of Science“ Datenbanken zu „Bionik im engen Sinn“ („bionic*“ oder „biomim*“) zugeordnet werden (Zeitraum: 1995-2004), wobei die zwanzig meistgenannten Wissenschaftsbereiche der besseren Übersicht halber zu gröberen Kategorien (wie Chemie, Physik) aggregiert wurden. Es zeigt sich hierbei in den Fachpublikationen eine klare Dominanz bestimmter Bereiche der Chemie (physikalische, organische, multidisziplinäre Chemie). In allen der untersuchten sechs Länder (China, Frankreich, Großbritannien, Japan, USA und Deutschland) entfallen über die Hälfte der disziplinären Zuordnungen der veröffentlichten Artikel auf diese Bereiche.

---

95 Durchsuchte Datenbanken sind: WPINDEX/WPIFV (42 wichtigste Industrieländer), Japio (Japan), IFI-PAT (USA), EPfull (Europäisches Patentamt), PCTfull (World Intellectual Property Organisation), PATDPA-full (Deutschland). SPATFULL (USA). Bei den Patentanalysen haben wir das enge Verständnis der Bionik um den Begriff „bio-inspired“ ergänzt. Allerdings führte nach Auskunft von PATON diese Ergänzung lediglich zu einer marginalen Veränderung der Trefferzahl im Vergleich zu Suche nach „bionic*“ oder „biomimeti*“.

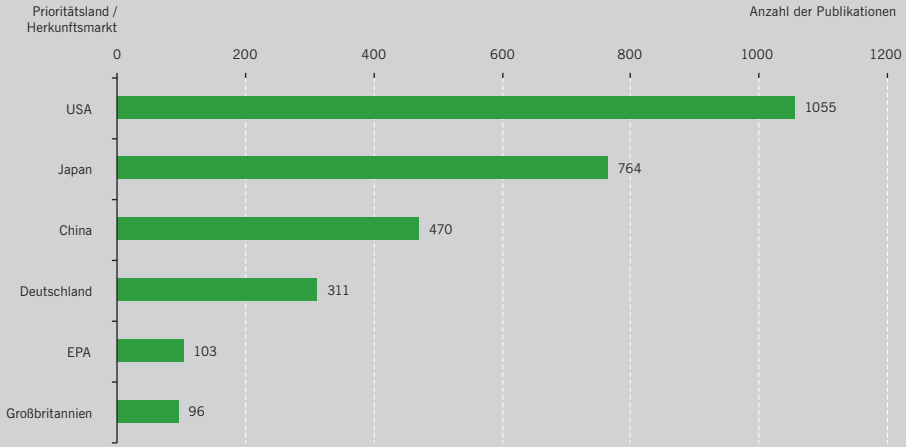
96 Die Anzahl der chinesischen Patente sollte nicht überbewertet werden. Stichprobenartige Analysen zeigten, dass Patente, die in China zu Bionik im engen Sinn angemeldet werden, sehr stark von unserem Verständnis der Bionik abweichen.

Abbildung 17 — Patentveröffentlichungen nach Ländern für den Zeitraum 1995 bis 2004 zum engen Bionikbegriff (»bionic*« und »biomimetic*«[97])



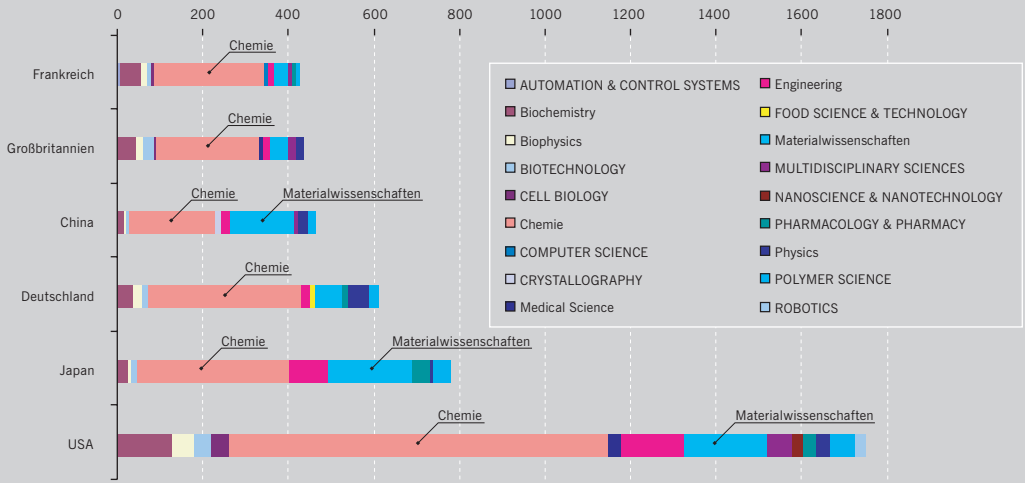
[Quelle: Paton Patentzentrum Thüringen GmbH — Weltdatenbank WPIDS (Letztes Update 22.03.2007) — * Zwischen Anmeldung und Veröffentlichung eines Patents liegen durchschnittlich 18 Monate!]

Abbildung 18 — Patentveröffentlichungen nach Ländern für den Zeitraum 1995 bis 2004 zum weiten Bionikbegriff (»bionic*«, »biomim*«, »bio(-)insp*«, »self-orga*«, »self-repair*« und »self-heal*«)[98]



[Quelle: Paton Patentzentrum Thüringen GmbH — Weltdatenbank WPIDS (Letztes Update 22.03.2007) — * Zwischen Anmeldung und Veröffentlichung eines Patents liegen durchschnittlich 18 Monate!]

Abbildung 19 — Literaturveröffentlichungen nach Wissenschaftsbereichen und Ländern zu Bionik im engen Sinn (»bionic*« und »biomim*«)



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Ebenfalls häufig genannt werden (zwischen 10% und 20%) Materialwissenschaften. Allerdings dürfen diese Zuordnungen lediglich als Hinweis und nicht als Beleg gewertet werden, da jeder einzelne Artikel in den „Web of Science“ Datenbanken mehreren und zudem unterschiedlich vielen Disziplinen zugeordnet werden kann, wobei nicht ersichtlich ist, welche Patente wie vielen und welchen Disziplinen zugeordnet sind. Von der Feststellung, dass über 50% der Zuordnungen auf die Chemie entfallen, kann also nicht die Aussage abgeleitet werden, 50% der Patente entstammten dieser Disziplin.

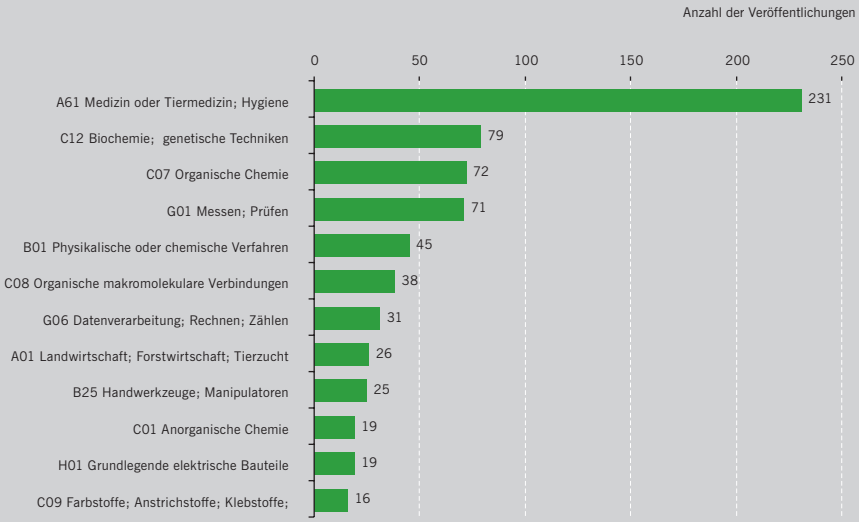
Zuordnung der Patentveröffentlichungen zu F&E-Bereichen

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Patenten sind wiederum – neben den wissenschaftlichen Disziplinen (Wissenschaftsbereichen), aus denen die Patentanmeldungen stammen – die Forschungs- und Entwicklungsbereiche, für welche die Patente angemeldet werden, besonders interessant. Die Analyse der F&E-Bereiche, für die Patente mit Nennung der Suchbegriffe „bionic*“ und „biomim*“ angemeldet wurden, zeigt hierbei ein ähnliches Bild wie das vorhergehend skizzierte zu den Literaturanalysen (vgl. Abbildung 19). Chemie und

97 Mit „WIPO“ sind Patente gemeint, die weltweit angemeldet werden (bei der World Intellectual Property Organization)

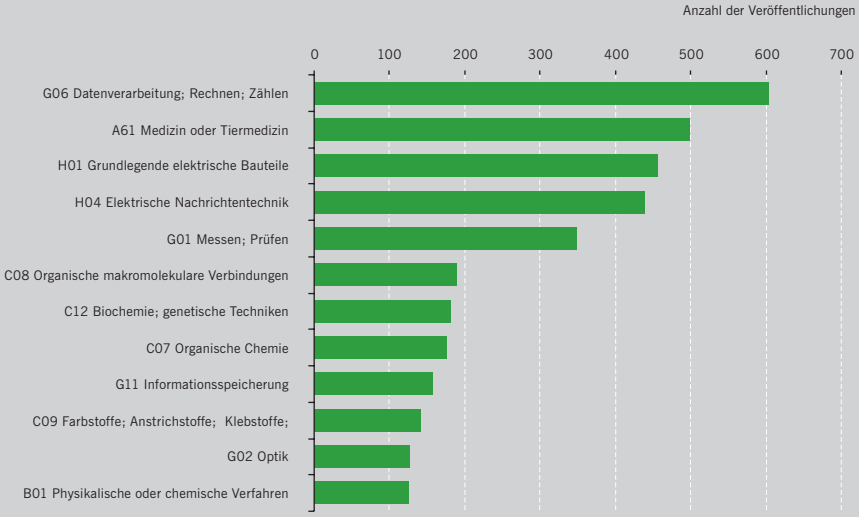
98 Unter „EPA“ ist die Anzahl der Patente abgebildet, die beim Europäischen Patentamt angemeldet werden.

Abbildung 20 — Patentveröffentlichungen nach F&E-Bereichen zu Bionik im engen Sinne.



[Quelle: Paton Patentzentrum Thüringen GmbH — Weltdatenbank WPIDS (Letztes Update 22.03.2007) — * Zwischen Anmeldung und Veröffentlichung eines Patents liegen durchschnittlich 18 Monate!]

Abbildung 21 — Patentveröffentlichungen nach F&E-Bereichen zu den um »self-organi*«, »self-heal*«, »self-repair*« erweiterten Suchkriterien



[Quelle: Paton Patentzentrum Thüringen GmbH — Weltdatenbank WPIDS (Letztes Update 22.03.2007) — * Zwischen Anmeldung und Veröffentlichung eines Patents liegen durchschnittlich 18 Monate!]

Biochemie sind als F&E-Bereiche sehr stark vertreten. Die Materialwissenschaften scheint es als F&E-Bereich nicht zu geben. Die entsprechenden Anmeldungen sind vermutlich auf mehrere Gebiete verstreut (C08, C09, B29). Ein wesentlicher Teil davon könnte evtl. (über die Prothetik) in die hier absolut dominierende Medizin eingeflossen sein (vgl. Abbildung 20).

»Bionics« und Prothetik/Medizin

Es wurde bereits mehrfach erwähnt, dass insbesondere der Begriff „bionics" und dessen Abwandlungen im englischsprachigen Raum sehr eng mit Prothetik bzw. dem Nachbau von menschlichen Organen und Geweben verbunden wird. Dies könnte die Dominanz der Medizin evtl. erklären. Aber auch in Deutschland, Japan und China stammen sehr viele Patente aus den Bereichen Medizin, Chemie, Biochemie, so dass nicht genau nachvollzogen werden kann, weshalb eine so starke Dominanz des Bereichs „Medizin/Tiermedizin und Hygiene" vorliegt. Auch hier gilt, dass die einzelnen Patente mehreren F&E-Bereichen gleichzeitig zugeordnet werden können, so dass nicht nachvollziehbar ist, wie viele Patente sich tatsächlich hinter den Zuordnungen verbergen.

Wenn man nun die erweiterten Suchbegriffe zugrunde legt, welche für die Kategorie „Lernen von der Natur" stehen, zeigt sich ein deutlich anderes Bild. Es gibt eine Fünfer-Spitzengruppe, in der nur die Felder „Medizin" und „Messen und Prüfen" identisch sind mit der Spitzengruppe bei den Abfragen nach „bionic*" und „biomim*". Alle übrigen Felder stammen aus dem Bereich der „Informations- und Kommunikationstechnologie", und der Bereich „Datenverarbeitung" rückt an die Spitze. „Grundlegende elektrische Bauteile" und „Elektrische Nachrichtentechnik" nehmen den dritten und vierten Platz ein. Erst dann kommen mit deutlichem Abstand die „organische Chemie" und „Biochemie". Die erweiterten Suchbegriffe „self-organisation", „self-healing" und „self-repair" erschließen also vor allem zusätzliche IKT-Bereiche. Sie erhöhen aber auch signifikant die Trefferquote bei Werkstoff- und Nanotechnik-Themen.

Länderspezifische Verteilung der Patente

Untersucht man nun die länderspezifische Verteilung der Patente für „Bionik im engen Sinne", zeigt sich, dass in den meisten Ländern ungefähr die Hälfte der Patentanmeldungen auf die Bereiche „Medizin", „Biotechnologie" und „Organische Chemie" entfallen. In den USA und Japan werden auffällig mehr Patente aus dem Bereich „Messen und Prüfen" angemeldet. Deutschland zeigt eine eher durchschnittliche Verteilung.[99]

99 Diese Aussage stützt sich auf feinere Analysen der Bereiche, aus denen die Patente stammen. Aus Übersichtlichkeitsgründen bilden wir nur die eine Graphik ab.

Die Analyse der Patentveröffentlichungen zum „Lernen von der Natur“ zeigt – wie auch bei der Literaturanalyse – ein anderes Bild. In keinem Land gibt es eine dominierende Disziplin. In den USA lassen sich insbesondere die Bereiche „Datenverarbeitung, Rechnen, Zählen“, „Elektrische Nachrichtentechnik“ und „Messen und Prüfen“ als für die Forschungslandschaft bedeutend ansehen, in Japan sind es „Grundlegende elektrische Bauteile“ und „Datenverarbeitung, Rechnen, Zählen“. In Deutschland sticht lediglich der Bereich „Grundlegende elektrische Bauteile“ etwas hervor.

Wenn man sich auf die Unterschiede zwischen den engen und den erweiterten Suchkriterien konzentriert, fällt auf, dass sich in den USA der Anteil in den Bereichen „Nachrichtentechnik“, „Messen und Prüfen“, „Informationsspeicherung“ und „Organische Chemie“ signifikant erhöht, wenn man die erweiterten Suchbegriffe zugrunde legt. In Japan und in Deutschland erhöht sich der Anteil im Bereich „Grundlegende elektrische Bauteile“.

Die meisten Patente werden von Unternehmen angemeldet

Eine Analyse der Akteure zeigt, dass die meisten Patente, die mit den erweiterten Suchbegriffen erfasst werden konnten, von Unternehmen angemeldet wurden.[100] Die Spitzenreiter stammen vor allem aus Japan. Dazu gehören unter anderem Sony, Seiko, Toshiba, Fuji. Aus Deutschland konnten sich Infineon und Siemens unter den zwanzig Einrichtungen mit den meisten Patentanmeldungen platzieren, aus den USA International Business Machines Corporation, University of California, Motorola und IBM, aus Korea Samsung und aus China die Universität Shanghai.

Zitationshäufigkeiten von wissenschaftlichen Artikeln

Neben der bloßen Anzahl von Fachartikeln in den „Web of Science“ Datenbanken sind im Zuge der hier dargestellten Untersuchungen auch Zitierungen dieser Artikel analysiert worden. Durch eine Analyse der Häufigkeit von Zitierungen lassen sich nämlich neben der Quantität auch Aspekte der Bedeutung bzw. Qualität der betreffenden Veröffentlichungen erfassen. Die Häufigkeit, mit der ein Text zitiert wird, gilt als Maß für die Qualität bzw. wissenschaftliche Bedeutung dieses Textes. Eine Abfrage beim „Web of Science Citation Report“ ergab dabei für die gefundenen 4.878 Veröffentlichungen zu „Bionik im engen Sinne“ insgesamt 72.823 Zitierungen, was einem Durchschnitt von 15 Zitierungen entspricht. 46% der Zitierungen entfielen auf Publikationen aus den USA, auf Japan, Deutschland und England entfielen je ca. 10%. Nimmt man Frankreich mit 6,7% und China mit nur 2,5% noch hinzu, decken die genannten Länder 86% aller Zitierungen ab. Amerikanische (21,2) und englische (20,8) Veröffentlichungen

100 Auch diese Aussagen stützen sich auf hier aus Übersichtlichkeitsgründen nicht abgebildete Analysen.

werden, gefolgt von Deutschland mit 16,6 Zitaten je herausgegebener Veröffentlichung, am häufigsten zitiert und haben damit einen größeren wissenschaftlichen „Impact". Während Frankreich und Japan nur knapp unter dem weltweiten Durchschnitt liegen, weisen chinesische Veröffentlichungen den deutlich niedrigsten Wert der betrachteten Länder auf.

»Scientific Impact«

Legt man die erweiterten Suchbegriffe zugrunde („Lernen von der Natur"), verschiebt sich das Bild nur leicht. Es fällt jedoch auf, dass die Publikationen aus Deutschland durchschnittlich weniger häufig zitiert werden als französische oder englische Publikationen, obwohl deutsche Veröffentlichungen den zweitgrößten Anteil an Gesamtveröffentlichungen einnehmen (13%, weit vor 7% aus England und 7,5% aus Frankreich).

Netzwerkanalyse

Identifikation von Kooperationen über gemeinsame Publikationen

Die Netzwerkanalyse beruht wieder auf der Analyse der Publikationen zu „Bionik im engen Sinne" und zu „Lernen von der Natur" in den Literaturdatenbanken des „Web of Science".[101] Je Land wurden nur die führenden 25 Einrichtungen mit den meisten Veröffentlichungen näher analysiert und ausschließlich Kooperationen dargestellt, die sich in mindestens zwei gemeinsamen Veröffentlichungen („Bionik im engen Sinne") bzw. in mindestens fünf gemeinsamen Publikationen („Lernen von der Natur") dokumentieren. Die Ergebnisse der Analyse wurden anschließend mit dem Programm „NetDraw" graphisch dargestellt. Dabei entspricht die Größe der Knotenpunkte der Anzahl der Veröffentlichungen und die Verbindungsstärke der Anzahl der gemeinsamen Veröffentlichungen.[102] Nachfolgend bilden wir Forschungsnetzwerke zu „Bionik im engen Sinne" und zu „Lernen von der Natur" für die Länder USA, China, Frankreich, Japan, England und Deutschland ab.

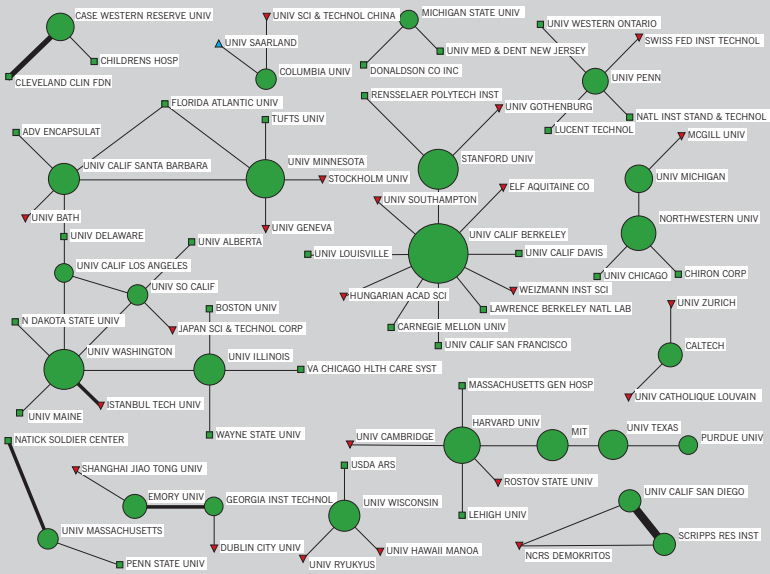
Kooperationen USA

In der US-amerikanischen Forschungslandschaft zu „Bionik im engen Sinne" (Abbildung 21) fällt auf, dass jede der 25 führenden Einrichtungen mit mindestens einer weiteren Einrichtung eine Kooperation eingeht. Die stärkste Zusammenarbeit findet zwischen dem Scripps

101 Recherchiert wurde von 1990-2005 mit den Suchbegriffen „bionic" oder „biomimetic" bei der Analyse der Bionik im engen Sinne und mit den Begriffen „bionic*", „biomimeti*", „bio-inspir*", „self-repair*", self-heal*", „self-organi*" für die Analyse der Publikationen zu „Lernen von der Natur".

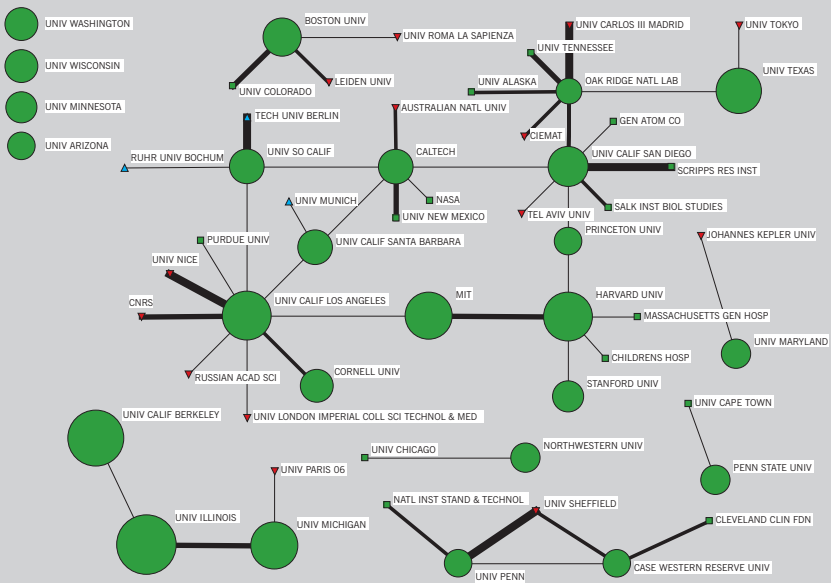
102 Knotensymbole: Kreis = Die Einrichtung gehört zu den führenden 25 Einrichtungen des jeweiligen Landes. Quadrat/Grün = Kooperationspartner Inland, der nicht zu den Top 25 gehört. Dreieck/Rot = (beliebiger) Kooperationspartner Ausland. Blau = Kooperationspartner aus Deutschland. Verbindungsstärke: Anzahl der gemeinsamen Veröffentlichungen bei der Analyse „Bionik im engen Sinne (in Klammern Werte für die Analyse „Lernen von der Natur") 1pt = 2 – 3 (5-6), 2pt = 4 – 6 (7-8), 3pt = 7 – 10 (9-10), 4pt = mehr als 10 gemeinsame Veröffentlichungen.

Abbildung 22 — Amerikanische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 23 — Amerikanische Netzwerke zu »Lernen von der Natur«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Research Institute und der UC San Diego statt mit insgesamt 13 gemeinsamen Publikationen. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Einrichtung mit den meisten Veröffentlichungen, die University of California Berkeley, mit insgesamt zehn weiteren Einrichtungen zusammenarbeitet, wobei jedoch die Anzahl der gemeinsamen Publikationen drei nicht überschreitet.

Auch an der Forschungslandschaft zu „Lernen von der Natur" (Abbildung 23) ist die Vernetzung der Akteure auffällig. Lediglich vier Universitäten publizieren ohne Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen. Zwölf der am meisten publizierenden Einrichtungen sind in einem Netzwerk miteinander verknüpft, das um die Universitäten Harvard, San Diego, Caltech, Los Angeles und MIT gespannt ist.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Akteurslandschaft in den USA sich insbesondere dadurch aus zeichnet, dass es eine relativ große Anzahl an Instituten gibt, die viel publizieren und die untereinander vernetzt sind.

Kooperationen China

Eine Institutionenanalyse der Ergebnisse für China (Abbildung 24 und Abbildung 25) zeigt, dass sowohl die Forschung zu Bionik im engen Sinn als auch zu „Lernen von der Natur" in China auf die Chinese Academy of Sciences (CAS, eigentl. Zhongguo Kexueyuan) konzentriert ist. Die CAS ist das wichtigste wissenschaftliche und technologische Beratungsorgan der chinesischen Regierung. Zusätzlich zu diesen Beratungsaufgaben verwaltet sie über 100 Forschungsinstitute.[103] Wie in keinem anderen der untersuchten Länder konzentrieren sich hier die Aktivitäten sowohl zu Bionik im engen Sinn als auch zu „Lernen von der Natur". Die CAS ist allerdings auch sonst an knapp 20% aller Einträge chinesischer Institutionen im „Web of Science" beteiligt. Die Veröffentlichungen der CAS zu Bionik und verwandten Begriffen liegen immerhin bei gut 17% aller Bionikveröffentlichungen Chinas.

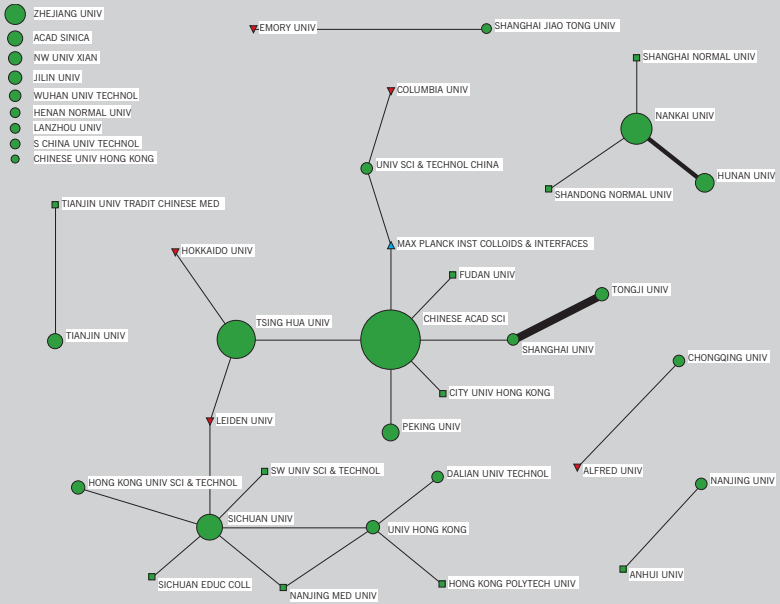
Das Netzwerk konzentriert sich auf die Chinese Academy of Science, der Einrichtung mit den mit Abstand meisten Veröffentlichungen des Landes (332 Publikationen, rund ¼ der landesweit herausgegebenen Veröffentlichungen). Die Chinese Academy of Science arbeitet mit insgesamt acht Kooperationspartnern (zwei davon aus dem Ausland) zusammen. Die stärkste Zusammenarbeit besteht zwischen der Academy Sinica und der Bejing Normal University (12 gemeinsame Publikationen).

Mehr als die Hälfte der führenden 25 Einrichtungen publiziert ohne Kooperationen mit anderen Einrichtungen.

---

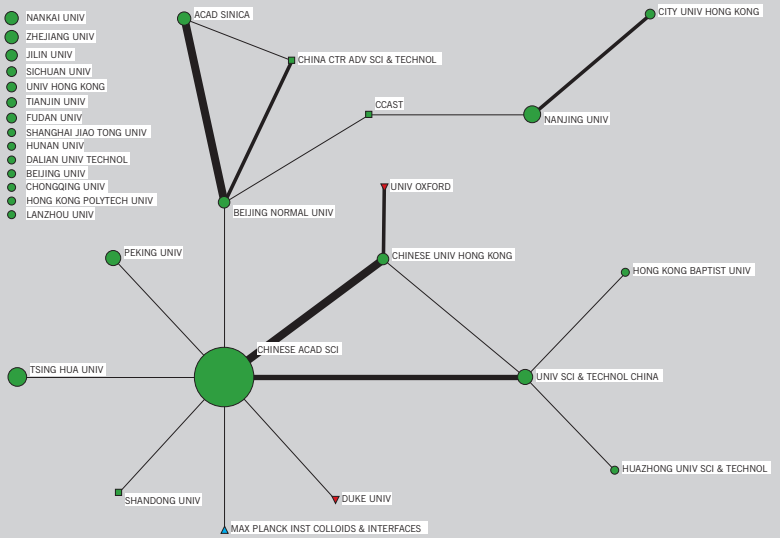
103 Quelle: VDI-Technologiezentrum 2006. S. 18.

Abbildung 24 — Chinesische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 25 — Chinesische Netzwerke zu »Lernen von der Natur«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Kooperationen Frankreich

In Frankreich (Abbildung 26 und Abbildung 27) tritt, ähnlich wie in China, ein Akteur besonders hervor, das Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), das die meisten Publikationen sowohl zu Bionik im engen Sinne (60 Einträge) als auch zum „Lernen von der Natur" (287) publiziert. Die Forschungslandschaft zu „Bionik im engen Sinne" ist um die drei zentralen Akteure CNRS, Universität Paris 05 und Universität Paris 06, welche eine enge Zusammenarbeit mit dem College de France pflegt (vier gemeinsame Veröffentlichungen), gruppiert.

Auch in der Grafik zu „Lernen von der Natur" (Abbildung 27) fällt insbesondere die starke Vernetzung auf. Staatliche Einrichtungen wie CNRS, das Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), die CENS sowie zahlreiche Universitäten spannen kraft enger Verbindungen durch gemeinsame Veröffentlichungen ein zentrales Netzwerk mit 19 beteiligten Einrichtungen auf. Darüber hinaus existieren drei Netzwerke mit jeweils drei Einrichtungen.

Kooperationen Japan

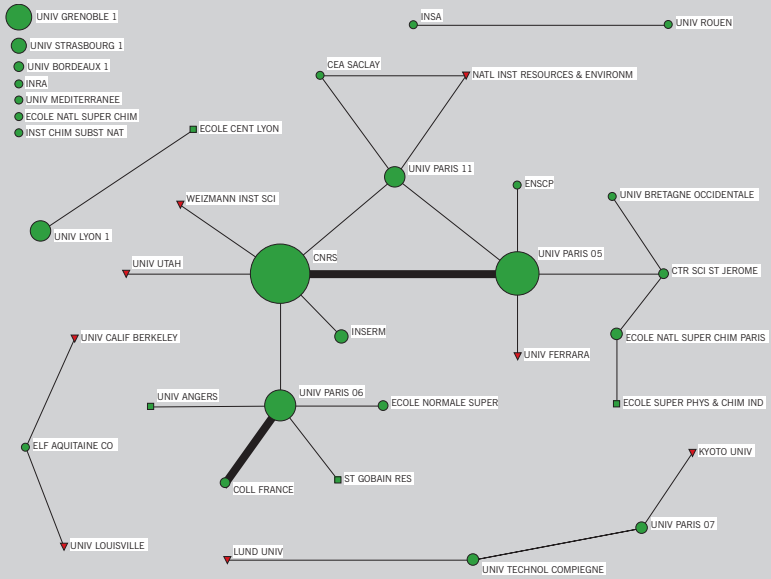
In Japan veröffentlichen sechs der 25 führenden Einrichtungen auf dem Gebiet der „Bionik im engen Sinne" weniger als zwei bis keinen Artikel zusammen mit anderen Einrichtungen (Abbildung 28). Die stärksten sichtbaren Kooperationen bestehen zwischen dem Nara Institute of Science and Technology, dem Toyobo Research Center Co Ltd. und dem Kyushu Institute of Technology (9 bzw. 8 gemeinsame Publikationen). Die führende bionische Forschungseinrichtung, die Kyoto University, arbeitet mit acht weiteren Einrichtungen zusammen, insbesondere mit dem Kyoto Institute of Technology und dem Matsue National College of Technology (jeweils 6 gemeinsamen Publikationen).

Auf dem Gebiet des „Lernens von der Natur" (Abbildung 29) nimmt die University of Tokyo mit insgesamt acht Kooperationspartnern und durchschnittlich mehr als sechs gemeinsamen Publikationen mit jeder dieser Einrichtungen eine Schlüsselposition in den japanischen Netzwerken ein. Daneben scheint auch das Netzwerk um die Universitäten Kyoto, Osaka und Kyoto Institute of Technology eine bedeutende Rolle innerhalb der japanischen Forschungslandschaft zu Bionik zu spielen. Darüber hinaus existieren fünf kleinere Netzwerke mit unterschiedlich starker Ausprägung, an denen das Kyushu Institute of Technology sowie die Nagoya University beteiligt sind.

Kooperationen England

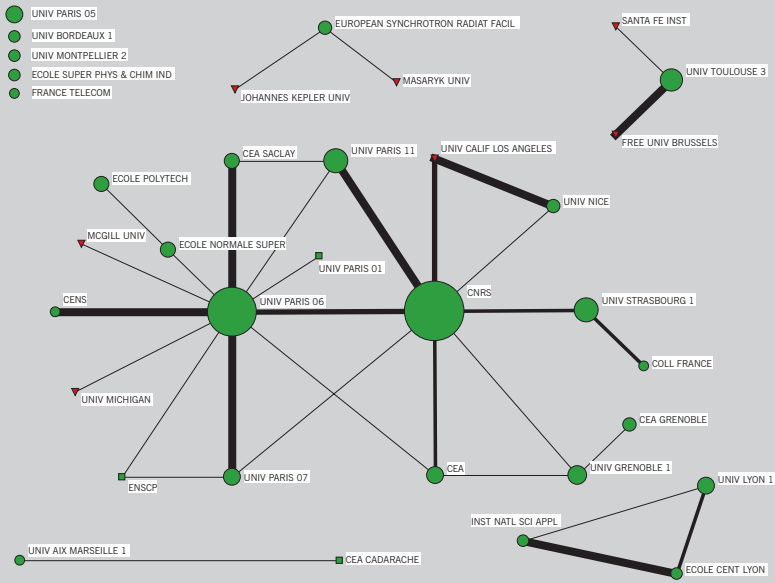
In der englischen Forschungslandschaft zu Bionik im engen Sinn (Abbildung 30) lassen sich drei Zentren ausmachen, von denen Kooperationen ausgehen: die Universitäten von Southampton, Cambridge und Oxford. Die University of Southampton hat mit der University of Nottingham (4) und die University of Oxford mit der University

Abbildung 26 — Französische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 27 — Französische Netzwerke zu »Lernen von der Natur«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

of Loughborough (6) sowie der University of Dundee (4) gemeinsam veröffentlicht. Bemerkenswert ist, dass die Universitäten Bath und Reading, die im englischen Bionis-Netzwerk eine zentrale Stellung einnehmen,[104] hier zwar als Akteure erkennbar, aber nicht an den drei veröffentlichungswirksamsten Netzwerken beteiligt sind. Auch dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass diejenigen Institutionen, die sich explizit zur Bionik bzw. Biomimetik bekennen (und sich in an diesen Begriffen orientierenden Netzwerken organisieren) nicht als besonders veröffentlichungsstark in internationalen Zeitschriften herausstechen, und dass stattdessen mittels Publikations- und Patentanalysen eher Publikationen und Institutionen erfasst werden, die sich im weiteren Umfeld der bionischen Ansätze bewegen.

Bei der Betrachtung der Forschungslandschaft zu „Lernen von der Natur" fällt auf, dass in England der Großteil der führenden Einrichtungen ohne Kooperationen (18 Einrichtungen) publiziert. Dazu gehören auch die Träger des BIONIS-Netzwerkes, die Universitäten Bath und Reading. Es lässt sich ein einziges Netzwerk mit über drei Akteuren identifizieren, das um die Universität Oxford gruppiert ist. Die stärksten Kooperationen gehen englische Einrichtungen mit ausländischen Einrichtungen ein.

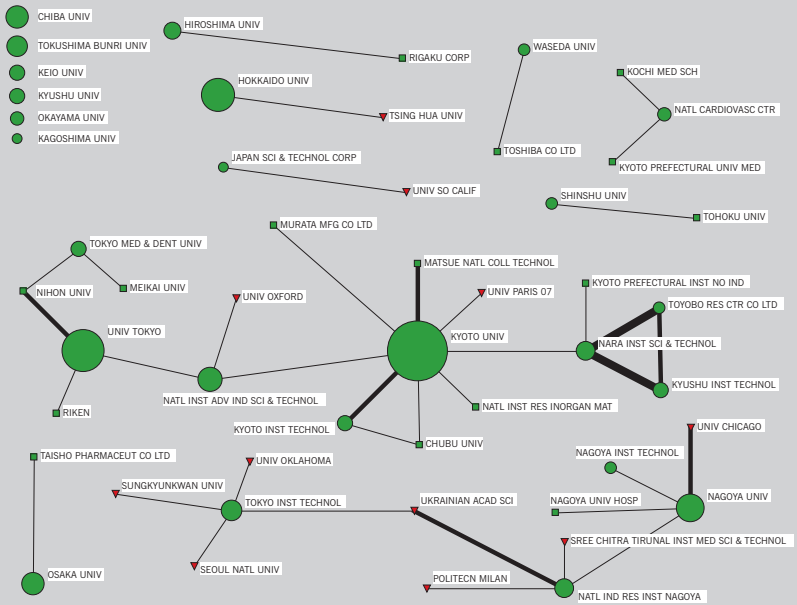
Kooperationen Deutschland
› s.Abb. 9 und 11, Kapitel 4.5

Das Auffällige an der deutschen Forschungslandschaft zu beiden Bionik-Auffassungen (Abbildung 9 und Abbildung 11) besteht in der großen Anzahl von meistpublizierenden Einrichtungen, die mit keiner anderen Institution zusammen publizieren (13 bei „Bionik im engen Sinne" und 12 bei „Lernen von der Natur"). Das Feld der „Bionik im engen Sinne" besteht aus vielen kleinen Netzwerken (Abbildung 9). Die fruchtbarsten Kooperationen bestehen zwischen dem MPI für Polymerforschung und der Universität Mainz, zwischen der Universität Ulm und der Moskauer Lomonosow-Universität sowie zwischen der Uni Regensburg und der Rice University.

Die deutsche Forschungslandschaft zum „Lernen von der Natur" zeichnet sich durch ein zentrales Netzwerk aus, das um die TU Berlin gruppiert ist (Abbildung 11). Dieses weist starke Verknüpfungen in die USA und nach Russland (Russian Academy of Science, Ioffe-Institut) auf. Darüber hinaus existieren sieben kleinere Netzwerke, sechs von denen aus zwei Kooperationspartnern bestehen.

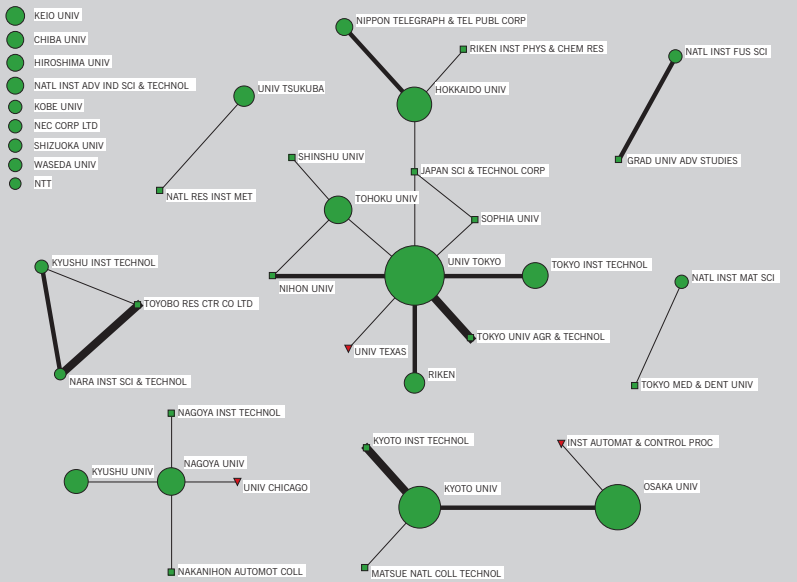
104 Quelle: Internetseite des Biomimetics Network for Industrial Sustainability auf dem Server der University of Reading, http://www.extra.rdg.ac.uk/eng/BIONIS/what_is_bionis.htm.

Abbildung 28 — Japanische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne«



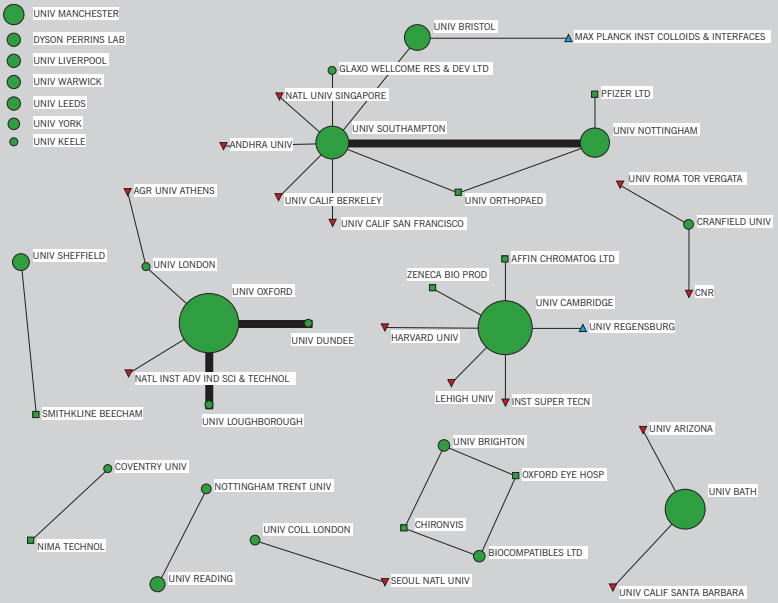
[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 29 — Japanische Netzwerke zu »Lernen von der Natur«



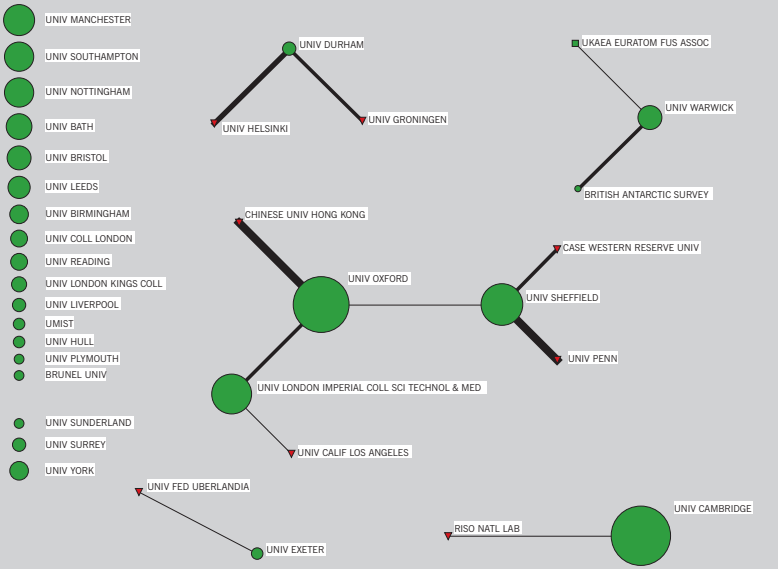
[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 30 — Englische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

Abbildung 31 — Englische Netzwerke zu »Lernen von der Natur«



[Quelle: eigene Darstellung — basierend auf Daten der Web-of-Science-Datenbanken]

4.7 Bionik in Bildung und Ausbildung

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Analyse der bionischen Ausbildungslandschaft in Deutschland dar. Dabei geht es auch um die Frage wie eine Ausbildung für bionische Lösungsansätze gestaltet werden könnte. Zunächst wird erörtert, inwieweit Bionik Eingang in den Schulunterricht und in die universitäre Ausbildung gefunden hat. Diese Ergebnisse basieren im Wesentlichen auf Internet- und Literaturanalysen sowie Datenbankrecherchen, wie sie in Kapitel 4.5 dargestellt wurden.

› s. Kapitel 4.5

Anschließend wird die Frage diskutiert, in welcher Form Bionik im Hochschulbereich verankert werden könnte bzw. sollte. Dafür werden die Ergebnisse von Literaturanalysen hinzugezogen, in denen es um die Ausbildung von Fähigkeiten in den Komplexitätswissenschaften bzw. den „enabling technologies“ wie etwa den Nanowissenschaften geht. Gestützt wird der Abschnitt durch Experteninterviews mit Wissenschaftlern, die im Bereich der Bionik (im engen sowie im weiten Sinne) forschen.

Stand der Bionik-Ausbildung

Bionik als spannender Zugang zu Naturwissenschaft und Technik in der Schule

Die Bionik eröffnet für den Schulunterricht hervorragende Möglichkeiten, naturwissenschaftliche und technische Inhalte spannend zu vermitteln und so ggf. ein bleibendes Interesse für Natur und Technik bei Jugendlichen zu wecken. Bisher ist die Bionik im Schulunterricht jedoch nicht fest verankert, was u. a. auch damit zusammenhängt, dass Bionik extrem interdisziplinär, der Schulunterricht ab der vierten Klasse dagegen stark disziplinär ausgerichtet ist. Allerdings bietet der Projektunterricht die Möglichkeit, Abstraktions- und Assoziationsfähigkeiten sowie Fähigkeiten zur Analogiebildung an begeisternden Beispielen zu üben (Nachtigall 2002, S. 447f.). Auch können Kompetenzen wie „fächerverbindendes naturwissenschaftlich-technisches Denken, Verständnis für industrielle Produktionsabläufe, kritische Aufgeschlossenheit für neue Technologien, Teamfähigkeit und Eigenverantwortlichkeit“ (Speck 2006) erworben werden.

Die Mitgliedern der Bionik-Community unternehmen deshalb auch schon seit geraumer Zeit gezielte Anstrengungen, um Bionik vermehrt an die Schulen zu bringen.[105] Allein im Jahr 2006 ist ein Lehrbuch Bionik für den Oberstufenunterricht (Hill 2006) und ein Kindersachbuch zu Bionik in der „Was ist was?“-Reihe (Zeuch 2006) erschienen.

105 Vgl. http://muenster-uni.biokon.net/: Auf dieser Homepage findet sich eine Sammlung von Experimentbeispielen für den Schulunterricht, eine Reihe von Arbeitsmaterialien zum Download bzw. zur Bestellung, Informationen zur Integration der Bionik in den Schulunterricht.

Insbesondere C. Mattheck bemüht sich erfolgreich um einen leichten Zugang zu den Inhalten seiner bionischen Forschungen und Anwendungen (Mattheck 1999, 2003, 2006). Neben Hill (Technikdidaktik Uni Münster) entwickelt die Plant Biomechanics Group Freiburg einfache und preisgünstige Versuchsaufbauten aus dem Bereich Bionik/Biomimetik mit dem Ziel, diese in Schulen oder in der Erwachsenenbildung einzusetzen (Speck 2006).

Bionik-Ausstellungen, insbesondere für Kinder und Jugendliche

Eine wichtige Rolle für die Vermittlung bionischen Wissens in der Öffentlichkeit, insbesondere auch bei Kindern und Jugendlichen, spielen Ausstellungen. Vom Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim wurden in Kooperation mit dem SiemensForum bspw. unter dem Titel „Bionik-Zukunfts-Technik lernt von der Natur“ zwei Wanderausstellungen und eine Dauerausstellung entwickelt.[106] Das Naturmuseum Solothurn erarbeitete die Ausstellung HighTechNatur – Von der Natur lernen, die unter anderem im Pfalzmuseum für Naturkunde gezeigt wurde. Jüngst eröffnete die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Osnabrück) in Kooperation mit dem BioKoN e.V. im November 2006 die Ausstellung „Inspiration Natur – Patentwerkstatt Bionik“, die sich insbesondere an Jugendliche wendet, um ihr Interesse für die Wissenschaft der Bionik zu wecken (so die Selbstdarstellung der Organisatoren[107]). Die Ausstellung ist als Wanderausstellung konzipiert, die ab Januar 2007 auch an Schulen ausgeliehen werden soll. Im Juni 2007 finden im Luisenpark Mannheim naturwissenschaftliche Erlebnistage zum Thema „Bionik“[108] statt.

Vergleich mit Initiativen in der Nanotechnologie

Doch ein Vergleich mit Initiativen, mit denen Schülern z. B. Nanotechnologien nahezubringen versucht wird zeigt, dass es noch weitere nachahmenswerte Ansätze gibt. Beispielsweise werden über eine Internet-Plattform (www.lehrer-online.de) Unterrichtseinheiten zur Nanotechnologie didaktisch aufbereitet und online verfügbar gemacht (Humpl et al. 2006), der Verein NanoBioNet entwickelte die „NanoToolBox“, Versuchsmaterialien, um Nanotechnologien zu veranschaulichen.[109,110] Der VDI hat einen Studienführer Nanotechnologien herausgegeben und das BMBF startete 2004 die Initiative Nanotruck (http://www.nanotruck.de), um die Technologie der breiten Öffentlichkeit und insbesondere Schülern vorzustellen.

---

106 Vgl. http://www.landesmuseum-mannheim.de/tp10301.htm; http://www.landesmuseum-mannheim.de/bionik/start.htm

107 http://www.dbu.de/123artikel26029_335.html?PHPSESSID=e5cebf9f76a93ac365e87ea7e5b43c09

108 http://www.explore-science.info/

109 Vgl. http://www.lehrer-online.de/dyn/9.asp?url=511473.htm

110 Auf der Homepage von BioKoN finden sich anschauliche Beispiele für bionische Experimente in der Schule. Inwiefern sie auch Eingang in den Schulunterricht finden, ist hingegen schwer nachzuvollziehen.

Tabelle 13 — Hochschulen mit Lehrveranstaltungen zu Bionik

Nr.	Hochschule	Lehre
1	RWTH Aachen	Lehrveranstaltung
2	Technische Universität Berlin	Lehrveranstaltungen, Wahlpflichtfach
3	Universität Bielefeld	Lehrveranstaltung
4	Universität Bochum	Lehrveranstaltung
5	Universität Bonn	Lehrveranstaltungen
6	Hochschule Bremen	Internationaler Studiengang Bionik (ISB)
7	Universität Bremen	Lehrveranstaltungen
8	Technische Universität Darmstadt	Interdisziplinärer Studienschwerpunkt Biotechnik
9	Technische Universität Dresden	Lehrveranstaltungen
10	Universität Freiburg	Universitäres Forschungsprojekt
11	Technische Universität Ilmenau	Studienschwerpunkt Biomechatronik
12	Hochschule Magdeburg-Stendal	Lehrveranstaltung
13	Universität Münster	Lehrveranstaltungen
14	Hochschule Saarbrücken	Lehrveranstaltungen
15	Universität des Saarlandes	Lehrveranstaltung (Studiengang Bionik – Technische Biologie im Jahr 2002 eingestellt)
16	Universität Tübingen	Lehrveranstaltung

[Quelle: eigene Recherche]

Bionik in der Hochschulbildung

Im Hochschulbereich ergibt sich ein sehr gemischtes Bild im Hinblick auf Bionik in der Lehre. Explizit bionische Vorlesungen, Seminare, Wahl- oder Pflichtfächer oder gar Studiengänge konnten deutschlandweit an nur 16 Hochschulen identifiziert werden (siehe Tabelle 13). Die überwiegende Zahl der Hochschulen bietet in diesem Zusammenhang „nur“ einzelne, meist nicht verpflichtende Lehrveranstaltungen an. Nur an fünf Hochschulen hat Bionik einen größeren Stellenwert und nur eine einzige Hochschule richtet einen grundständigen Studiengang Bionik aus (HS Bremen). Der von Prof. Nachtigall in Saarbrücken aufgebaute Bionik-Studiengang wurde mit dessen Emeritierung eingestellt.

Identifikation bionischer Lehrveranstaltungen

Allerdings muss vor einer Überinterpretation der in Tabelle 13 dargestellten Ergebnisse gewarnt werden. Die Schwierigkeit einer Recherche an Hochschulen mit bionischen Lehrveranstaltungen liegt – wie bei jeglichen Recherchen zu Bionik – darin, dass eine schwer abzuschätzende Anzahl von Lehrenden zwar Veranstaltungen mit bionischen Inhalten anbietet, diese aber nicht als solche kennzeichnet. Insofern kann lediglich davon ausgegangen werden, dass in obiger Tabelle alle Lehrveranstaltungen zu „Bionik im engen Sinne“, hingegen wahr-

scheinlich nur ein sehr kleiner Teil von Veranstaltungen zum „Lernen von der Natur“ erfasst sind. Beispielsweise wird an der TFH Wildau das Fach „Biosystemtechnik/Bioinformatik“ gelehrt, in dessen Rahmen auch Lehrveranstaltungen zu Biosensoren angeboten werden.[111] Die Abteilung Neurobiologie der Universität Ulm bietet Vorlesungen zu Sensorik, Bewegungskontrolle und Funktionsmorphologie an, am Fachbereich ist das Lab von Fritz-Olaf Lehmann „BioFutures Research Group“ angesiedelt, in dem die Flugeigenschaften von Insekten erforscht werden. Explizit ordnen die Lehrenden ihre Veranstaltungen jedoch weder der Bionik noch der Biomimetik zu. Daher kann diese Tabelle nur einen Hinweis darauf.

Wie soll bionische Ausbildung gestaltet werden?

Schon die Analyse der zentralen Entwicklungen und der technologischen Perspektiven der Bionik hat gezeigt, dass es sinnvoll ist, zwischen zwei Reichweiten der Bedeutung von Bionik zu unterscheiden: „Bionik im engen Sinne“ und „Lernen von der Natur“ (vgl. dazu insbesondere die Ausführungen am Beginn des Kapitels 4 sowie die Kapitel 2 und 3). Unsere Analysen der Bildungslandschaft der Bionik konzentrierten sich auf das enge Bionik-Verständnis. Ein weites Bionik-Verständnis könnte auch solche Ansätze erfassen, bei denen von der Natur zu lernen versucht wird, ohne dies ausdrücklich zu erwähnen. Solange aber keine Datenbanken existieren, in denen mithilfe der entsprechenden Suchworte recherchiert werden kann, würde eine derartige Recherche allerdings einen im Rahmen dieser Studie nicht leistbaren Aufwand erfordern.

›s. Kapitel 4 und Kapitel 2,3

»Lernen von der Natur« und »converging technologies« in Bildung und Ausbildung

Bionik im weiten Verständnis weist wie erwähnt auch zahlreiche Überschneidungen mit dem unter dem Stichwort „converging technologies“ gefassten Trend auf. Es wäre also sinnvoll, die Bionik im Rahmen einer Recherche nach anderen befähigenden Technologien („enabling technologies“) oder „general purpose technologies“ zu untersuchen und insbesondere eine entsprechend breitere Ausbildungskonzeption zu erarbeiten. Die konvergierenden Technologien werden große gesellschaftliche und ökonomische Veränderungen auslösen (vgl. BMBF 2006b). Die Entwicklung der Bionik hat diese Trend in gewisser Weise vorweg genommen. Bionik lässt sich also als ein Lernfeld begreifen, auf dem geeignete Ansätze und Konzepte des Umgangs mit converging technologies entwickelt werden können. Daher soll hier, über die engere Problematik eines Bionik-Curriculums hinaus, der Frage nachgegangen werden, auf welche Weise der wissenschaftliche Nachwuchs am

111 Vgl. http://www.tfh-wildau.de/bio/

besten auf die Entwicklung von bzw. den Umgang mit enabling bzw. general purpose technologies vorbereitet werden können.

Neues Paradigma im Umgang mit Komplexität

Minai et al. (2006) plädieren für ein neues Paradigma innerhalb der Ingenieurswissenschaften, welches auch Eingang in die Lehrinhalte an den Universitäten finden sollte. Die zentrale Herausforderung, vor denen Ingenieure in der Zukunft stehen werden, bestünde in der Bewältigung der wachsenden Komplexität von Technologien. Die Autoren unterscheiden hierbei zwischen „komplexen" und „komplizierten" Systemen (*ibid.*, S. 2). Letztere zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus einzelnen Elementen zusammengesetzt sind, wobei die Menge der Elemente den Grad ihrer Kompliziertheit ausmacht. „Komplexe" Systeme weisen hingegen selbstorganisierende, emergente Eigenschaften auf, weswegen das System nicht auf die Menge der Einzelelemente reduziert werden kann. Diese Unterscheidung ist wichtig, weil aus der Sicht von Minai et al. (2006) bisherige Ingenieure (und auch deren Ausbildung) darauf ausgerichtet sind, immer kompliziertere technologische Systeme zu entwickeln. Das Ziel des klassischen ingenieurwissenschaftlichen Ansatzes bestünde darin, technologische Anwendungen zu schaffen, die vom Entwickler direkt kontrollierbar sind, deren Eigenschaften explizit beschrieben werden können und deren Wirkungsweisen somit vorhersagbar sind (*ibid.*, S. 8).

Die Zukunft der Ingenieurswissenschaften sehen die Autoren im Erforschen komplexer Systeme mit dem Ziel, technologische Anwendungen zu entwickeln, die über komplexe Eigenschaften verfügen. Hierfür ist es nötig, dass sich die Ingenieure mit selbst-organisierenden, evolvierenden, selbst-reparierenden, anpassungsfähigen Eigenschaften beschäftigen. Sie fordern „a drastic re-evaluation of many fundamental assumptions and methods of the classical engineering paradigm" (Minai et al. 2006, S. 4). Ein erster Ansatz,, um eine solche Veränderung der Annahmen und Methoden des klassischen Paradigmas in die Realität umzusetzen, bestünde zumindest darin, die Inhalte der ingenieurswissenschaftlichen Ausbildung an den Universitäten um Veranstaltungen zu komplexen Systemen zu ergänzen.

»enabling technologies« und »general purpose technologies«

Überlegungen zur Ausbildung von Fachkräften, die fähig sind im Bereich von enabling technologies zu arbeiten und zu forschen, finden sich auch in Studien, die sich mit Fragen zur Ausbildung im Bereich der Nanotechnologien beschäftigen, die ja auch zu den „enabling bzw. general purpose technologies" gezählt werden (bspw. Humpl et al. 2006). Die Studie „Trendqualifikationen Nano" (Abicht et al. 2005) hat durch Umfragen bei Unternehmen, Netzwerken, Kompetenzzentren sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen herauszufinden versucht, welche Fachqualifikationen und Anforderungen im Bereich der Nanotechnologien erforderlich sind. Die Ergebnisse zeigen, dass in den meisten

Trendqualifikationen[112] eine Mischung aus dem Wissen aus Physik, Chemie, Biochemie, Biologie (und weiterer Fächer je nach Spezialisierung) gefordert wird. Dieses Ergebnis deutet ebenfalls auf die converging technologies, auf die nötige Verzahnung verschiedener naturwissenschaftlicher Einzeldisziplinen hin.

Bionik und Nanotechnologie in der Aus- und Weiterbildung

Humpl et al. untersuchen in ihrer Studie „Aus- und Weiterbildung in Nanowissenschaften und Nanotechnologien – Bestands- und Bedarfserhebung in Österreich" (Humpl et al. 2006) – auch Maßnahmen, die in Deutschland zur Förderung der Aus- und Weiterbildung in Nanowissenschaften und Nanotechnologien durchgeführt werden. Interessant ist hierbei, dass die schon erwähnte „NanoToolBox" u. a. Experimente zur Verdeutlichung des sogenannten Lotuseffekts beinhaltet.[113] Der Lotuseffekt gilt somit als ein paradigmatisches Beispiel für die Erfolge innerhalb der Bionik und in den Nanotechnologien. Auch in der vom BMBF herausgegebenen Broschüre „Nanotechnologie – Innovationen für die Welt von morgen" wird mehrfach mit bionischen Themen und Abbildungen (z. B. auch zum Geckofuß (Nutzung von van-der-Waals-Kräften) gearbeitet (BMBF 2006a) Auch dies verdeutlicht die Nähe der beiden Forschungsansätze, zeigt aber auch, dass die Anstrengungen zur Verankerung von Nanowissenschaften, Nanotechnologien und Bionik im weiten Sinne miteinander verzahnt werden können.

Mit Blick auf die Verankerung der Nanotechnologien in der Universitätsausbildung plädieren die Autoren für die Einführung von eigenständigen Studiengängen im Bereich der Nanowissenschaften. Außerdem fordern sie eine verstärkte Förderung von Diplomarbeiten und Dissertationen in diesem Bereich sowie eine verstärkte Durchführung von Informationskampagnen. Bezeichnend ist dabei folgendes Zitat aus einem ihrer Interviews:

> *„Immer mehr Physiker wollen durch den Nanotrend in Richtung Bio gehen, obwohl sie sich dort nicht auskennen. Ich meine, auf den ‚Bio-Zug' sollten nur die aufspringen, die auch wirklich die Interdisziplinarität beherrschen. Es fehlt bei vielen unserer Leute das Bindeglied zwischen Biologie und Ingenieurswissenschaften. Ein Kombinationsstudium wäre toll. Ich werde auf der ganzen Welt eingeladen, weil ich in der Sprache der Techniker die Biologie erklären kann. Wenn man sich Nanobio aussucht, muss man viel in Bio und Nano lernen, und das machen viele Physiker nicht."*
>
> (HUMPL ET AL. 2006, S. 174)

112 Das sind: Nanochemie, Nanoanalytik, Nanobiotechnologie, Nanooptik, Nanoelektronilk

113 Humpl et al. 2006, vgl. auch : http://www.lehrer-online.de/dyn/9.asp?url=511473.htm

Notwendigkeit der Veränderung von Lehrinhalten

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Studien, die sich mit der Verankerung der „enabling technologies“ im Bildungssystem befassen, allesamt auf die Notwendigkeit einer Veränderung der Inhalte hin zu einer Beschäftigung mit selbstorganisierenden, evolvierenden Systemen, auf die Notwendigkeit einer stärkeren Verzahnung der einzelnen Disziplinen wie Physik, Biologie, Chemie, IT und auf die Notwendigkeit einer Einführung neuer Studiengänge verweisen.[114]

Interdisziplinarität

Während wir dem ersten Teil dieser Aussagen ohne Weiteres folgen können, sind wir mit Empfehlungen zur Einrichtung eigenständiger Studiengänge etwas vorsichtiger. Interdisziplinarität muss auf Disziplinariät aufbauen. Es gibt schließlich eine ganze Reihe guter Gründe, warum sich die Wissenschaften disziplinär organisiert und entwickelt haben. Dabei spielen u. a. die Entwicklung disziplinärer Tiefe und Ausdifferenzierung eine ebenso wichtige Rolle wie die Aufgaben der Qualitätssicherung (peer review). Bionik ist ein extrem breites „Fach“, welches neben der Biologie auf fast sämtlichen naturwissenschaftlich-technischen Anwendungsfeldern aufbaut. Die Bionik ist wahrscheinlich sogar breiter aufgestellt als die eben diskutierten Nanotechnologien, sie ist eher mit den „converging technologies“ vergleichbar. So gesehen ist Bionik eigentlich nur in interdisziplinären (Arbeits-)Zusammenhängen lehr- und lernbar.

Eigenständige vs. Aufbaustudiengänge

Die Frage bleibt allerdings, wie Bionik (jenseits derartiger seltener idealer Konstellationen) dennoch für die Lehre in einer Weise etabliert werden kann, dass geeignete Grundlagen gelegt werden für die Fähigkeiten zu einer effektiveren und effizienteren Übertragung biologischer Phänomene auf technische Systeme. Eine Möglichkeit könnte darin bestehen, neue, eigenständige (Basis-)Studiengänge zu schaffen, in denen die für die Bionik im weiten Sinne relevanten Inhalte vermittelt werden. Das hieße, dass in diesen Studiengängen verstärkt Inhalte wie Selbstorganisation gelehrt würden. Die Studiengänge müssten zudem interdisizplinär ausgerichtet sein, da sie Wissen aus Chemie, Physik, Biologie, IT (und eventuell weiteren Disziplinen) vermitteln würden. Die für uns nahe liegendere Möglichkeit wären Aufbaustudiengänge (Master) und Promotionskolloquien zu bionischen Ansätzen basierend auf einer soliden natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Grundausbildung. Die derzeit stattfindende Umstellung auf Bachelor- und Masterstudiengänge in Deutschland bietet in diesem Zusammenhang gute Voraussetzungen, entsprechende bionische Aufbaustudiengänge einzuführen.

Derzeit kann noch nicht endgültig bewertet werden, welches Modell von Bionik in Ausbildung und Lehre am effektivsten ist. Der

114 Solche Empfehlungen finden sich zusätzlich in: Bruck et al. 2004, Bretthauer 2005, Rühle et al. 2001

grundständige Bionik-Studiengang an der Hochschule Bremen steht als Erfolgsmodell da, das ausgewertet bzw. wissenschaftlich begleitet werden sollte. Bisher sprachen sich die meisten der interviewten Experten allerdings eher für die Einführung von Aufbaustudiengängen aus. Sie argumentierten, dass das Verstehen bionischer Lösungsansätze für die technologischen Herausforderungen in erheblichem Umfang naturwissenschaftliche Grundlagen voraussetze. Insbesondere bedürften die Nachwuchswissenschaftler einer soliden Ausbildung in einer der Naturwissenschaften wie Biologie, Chemie oder Physik. Erst aufbauend auf dieser Qualifizierung mache es Sinn, sich der bionischen Forschung zuzuwenden und sich mit Themen aus weiteren Disziplinen zu beschäftigen. Einige der interviewten Wissenschaftler sind der Meinung, dass eine längere Ausbildungszeit nötig sei, um Wissenschaftler auszubilden, die an bionischen Projekten im weiten Sinne forschen könnten, da sie sich Wissen aus mehreren Disziplinen aneignen müssten. Versuche, dieses Wissen in einer kürzeren Zeit zu vermitteln, würden lediglich zur Abflachung des Ausbildungsniveaus und einer Verringerung der Chancen führen, an der Spitze der bionischen Forschung zu arbeiten.

Bionik-Studium an der Hochschule Bremen

Länge der Ausbildungszeit

Auch die im Rahmen der Schweizerischen Studie „Zukunft Engineering“ (Kiener 2005) befragten Experten waren sich einig, dass „Ingenieure mit einer starken disziplinären Basis“ unverzichtbar bleiben (S. 12). Diese Sichtweise wird auch durch die Arbeitsgruppe der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik bestätigt, die sich mit der Zukunft ihres Fachgebietes auseinander gesetzt hat (Bretthauer 2005). Auch dort wird darauf hingewiesen, dass die Automatisierungstechnik mit anderen Disziplinen (Informatik, Biologie) zusammenwachsen wird, und dass dem auch in der Ausbildung Rechnung getragen werden müsse, doch „im Mittelpunkt steht eine breite, solide Grundlagenausbildung im Maschinenbau, Elektrotechnik und Verfahrenstechnik“ (S. 157).

Da die bionische Forschung viele unterschiedliche Einzeldisziplinen einbezieht, die gewöhnlich nicht sehr eng miteinander vernetzt sind (wie bspw. Biologie und Informationstechnologien, oder im Falle der Einbeziehung des Themas „Selbstorganisation“ auch Geistes- und Sozialwissenschaften; vgl. bspw. Fromm 2005), erscheint die Idee vielversprechend, Projektteams zu bionischen Themen zu fördern. Diese Teams sollten aus Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen zusammengesetzt werden, die gemeinsam an einem bionischen Forschungsprojekt arbeiten. In solche Projekte könnten auch Nachwuchswissenschaftler integriert werden, die sich in ihren Promotionen auf Bionik spezialisieren.

Bionik umfasst eine Vielzahl von Einzeldisziplinen

Diese Forderung findet sich auch im Weißbuch der Max-Planck-Gesellschaft zur Zukunft der Materialwissenschaften (Rühle et al. 2001). Darin betonen die Autoren die Wichtigkeit einer Zusammenarbeit zwischen Physikern, Materialwissenschaftlern, Chemikern und Biologen (S. 306), um intelligente, biomimetische, selbst-anordnende Materialien zu entwickeln. Wege, um die interdisziplinäre Forschung zu intensivieren, sehen die Autoren in der Schaffung von Forschungsinstituten oder Laboratorien, in denen Wissenschaftler verschiedener Disziplinen arbeiten, sowie in der Vernetzung von Forschern unterschiedlicher Fächern (*ibid.*, S. 307).

4.8 Zwischenfazit zu Themen, Akteuren und Netzwerken

Bionik-Community ist verhältnismäßig klein

Die deutsche Akteurslandschaft mit explizitem Bionikselbstverständnis ist verhältnismäßig klein und zudem sehr heterogen gestaltet. Insgesamt konnten im Zuge der Untersuchungen ca. 170 Akteure identifiziert werden, die in irgendeiner Form einen Bezug zu Bionik aufweisen. Allerdings unterscheiden sich die einzelnen Akteure hinsichtlich der Art und der Intensität, in welcher sie Bionik treiben, sehr stark voneinander. Bspw. gibt es unter den Hochschulen eine relativ kleine Anzahl, bei welchen Bionik als Fachrichtung, Studiengang oder fakultätsübergreifendes Netzwerk institutionalisiert ist. In den meisten Fällen sind nur einzelne Personen an den jeweiligen Hochschulen mit Bionik beschäftigt. Bei außeruniversitären Forschungseinrichtungen gestaltet sich dies ähnlich. Der Kern der Bionik-Akteure lässt sich wiederum in zwei Gruppen aufteilen, je nachdem, ob sie in einem der deutschen Bionik-Netzwerke „BioKoN“ oder „Kompetenznetz Biomimetik“ organisiert sind oder nicht. Die beiden Bionik-Netzwerke organisieren nur einen Teil der Bionik-Akteure. Insbesondere die Unternehmen sind in den Netzwerken bisher unterrepräsentiert. Über die Publikations- und Patentanalysen lassen sich keine besonderen Schwerpunkte der deutschen Bionik identifizieren. Dies deutet darauf hin, dass die Akteure in Deutschland, die sich selbst auf die Begriffe Bionik und Biomimetik beziehen, zwar gut vernetzt sind, ihre gute Vernetzung aber noch zu wenig in internationale Publikationstätigkeit bzw. in Patente umsetzen.

Intensität der Bionik-Aktivitäten bei verschiedenen Akteuren höchst unterschiedlich

Institutionalisierung wenig fortgeschritten

Ansätze zu »Lernen aus der Natur« werden von einer Vielzahl von Akteuren verfolgt

Insgesamt ist der Kreis derer, die explizit Bionik bzw. Biomimetik betreiben, sehr viel kleiner als die Gruppe der implizit Bionik Treibenden, wie insbesondere die durchgeführten Datenbankanalysen ergeben haben. Es haben sich offenbar unabhängig voneinander in sehr vielen Forschungs- und Entwicklungsbereichen Ansätze heraus-

gebildet, die sich an biologischen Vorbildern orientieren. Akteursseitig ließen sich in diesem weiter gefassten Bionikverständnis keine fachlichen Schwerpunkte identifizieren, in denen besonders stark bionische Ansätze verfolgt würden. Die verschiedenen Akteure kommen aus den unterschiedlichsten Disziplinen und decken in ihrer Summe die potenziellen Bereiche ab, für welche Bionik infrage kommt. In der Tendenz scheinen jedoch die Bereiche Chemie und Biochemie, in denen laut Literaturrecherche eine Vielzahl bionischer Ansätze verfolgt wird, zumindest in den von Biologen dominierten Bionik-Netzwerken bisher unterrepräsentiert zu sein.

Bionische Ansätze in vielen Disziplinen und F&E-Bereichen vorhanden

In der zeitlichen Perspektive haben sowohl die Aktivitäten der Kern-Bioniker als auch derjenigen, die sich an einem weiteren Ansatz des Lernens von der Natur orientieren, in den vergangenen 15 Jahren stark zugenommen. Die Literaturdatenbankanalysen zeigen deutlich, dass nicht nur die Verwendung der Kernbegriffe „Bionik“ und „Biomimetik“ stark zunimmt, sondern dass auch bionische Konzepte wie „Selbstheilung“ oder „Selbstoptimierung“ vermehrt in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert werden. Die Zunahme gilt dabei nicht nur absolut, sondern auch in Relation zur gesamten wissenschaftlichen Publikationstätigkeit aus deutschen Forschungseinrichtungen.

Starke Zunahme der bionischen Ansätze in den vergangenen 15 Jahren

Auch auf internationaler Ebene zeigt sich, dass zu „Bionik im engen Sinne“ vor allem in den Disziplinen Medizin, Chemie, Biochemie, Materialwissenschaften geforscht wird. Es finden sich aber auch Publikationen aus vielen anderen Bereichen wie Computerwissenschaften, Polymere, Robotik, Ingenieurswissenschaften etc. Die Literatur- und Patentanalysen, denen ein weites Verständnis von Bionik zugrunde liegt („Lernen von der Natur“), liefern eine empirische Bestätigung der Hypothese, dass in den weiter gefassten Ansätzen der Bionik die Entwicklung der Konvergenztechnologien vorweggenommen wird. Denn die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse, bei deren Publikation Begriffe wie „bionics“, „biomimetics“, „bioinspired“, „self-organised“, „self-healing“, „self-repair“ (und ihren Abwandlungen) verwendet werden, findet hauptsächlich in Bereichen Physik, Chemie, Computerwissenschaften und Materialwissenschaften statt. Obwohl Deutschland einen hohen Anteil an Publikationen mit dem weiteren Verständnis von Bionik im Sinne eines „Lernens von der Natur“ aufweist (mehr als Japan, England und Frankreich), werden Publikationen aus Deutschland weniger häufig zitiert als die englischen oder französischen Veröffentlichungen. Was die Patente anbelangt, so werden in Deutschland nur halb so viele Patente angemeldet wie in Japan. Innerhalb der betrachteten Länder lassen sich mit den Mitteln der Literatur- und Patentanalyse jedoch keine disziplinären Schwerpunkte

Vielfältige Hinweise auf eine Verbindung von Bionik- und Konvergenz-Technologien

beobachten. Es sind weitestgehend die gleichen Disziplinen innerhalb der jeweiligen Länder, aus denen die Publikationen zu den beiden Bionik-Kategorien stammen.

Deutsche Bionik F&E relativ gut vertreten…

Bei den allgemeineren Ansätzen eines „Lernens von der Natur" kann man von einer besonderen Bionik-Stärke Deutschlands ausgehen. Deutschland ist bei den Publikationen sehr gut vertreten, aber ein geringerer „impact factor" (Zitierhäufigkeit insb. im Vergleich zu Beiträgen aus England oder Frankreich) und eine deutlich geringere Patentanmeldeaktivität im Vergleich zu Japan relativieren dieses Bild. Die deutsche Forschungslandschaft ist zudem bei Zugrundelegung eines weiten Verständnisses von Bionik („Lernen von der Natur") eher schwach vernetzt. Dies kann, neben der schon erwähnten, noch ausstehenden Integration in die bestehenden Bioniknetzwerke auch als ein Grund für den niedrigen „impact factor" angesehen werden, denn Kooperationspartner neigen dazu, sich gegenseitig zu zitieren.

…aber Potenziale werden noch nicht ausgeschöpft

Es gibt also Hinweise dafür, dass die deutsche F&E-Landschaft insbesondere hinsichtlich des erweiterten bionischen Ansatzes im Sinne eines Lernens von der Natur im internationalen Vergleich ihre potenzielle Stärke noch nicht richtig ausspielen kann. Dies äußert sich:

- in einem niedrigeren „impact factor" der von Autoren aus deutschen Forschungsinstitutionen verfassten Artikel im Vergleich zu englischen und französischen;
- in einer im Vergleich zu den anderen betrachteten Ländern schwachen Vernetzung der deutschen Akteure untereinander;
- in einer zumindest im Vergleich zu Japan deutlich geringeren Anzahl von angemeldeten Patenten.

Da wir davon ausgehen, dass das mittel- bis langfristige Potenzial der Bionik vor allem in diesem weiteren Verständnis der Bionik (bzw. in deren dritten Entwicklungsstrang) liegt, spricht einiges dafür, den entsprechenden Ansätzen innerhalb der IKT, Materialwissenschaften, Prothetik und Robotik eine hohe Aufmerksamkeit zu widmen.

Bionik als spannender Zugang zu Naturwissenschaft und Technik in der Schule

Für den Ausbildungsbereich lässt sich festhalten, dass die Bionik ein großes Potenzial besitzt, Jugendliche für Naturwissenschaften und Technik zu begeistern. Dies ist von besonderer Bedeutung in einer Zeit, in der die naturwissenschaftlichen Fächer in der schulischen Ausbildung nicht besonders nachgefragt werden, in der aber die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen gerade wissenschaftlich-technisch gut ausgebildete Mitarbeiter nachfragt bzw. voraussetzt. Dem gegenwärtigen und sich zukünftig wahrscheinlich noch verschärfenden Mangel an Naturwissenschaftlern und Ingenieu-

ren könnte mithilfe von bionischen Lehrinhalten an Schulen – sowohl in der Primar- als auch der Sekundarstufe – erfolgreich entgegengewirkt werden. Die Mitglieder der (engen) Bionik-Community nutzen diese Chancen bereits. Sie sollten dabei unterstützt werden.

Bionik in Hochschulen

Die Situation im Hochschulbereich ist hingegen schwieriger zu beurteilen: Nur eine kleine Anzahl an Hochschulen bietet derzeit explizit bionische Lehrveranstaltungen an, was aber nicht ausschließt, dass es viel mehr Lehrstühle gibt, die sich bionischen Themen widmen. Die Herausforderungen, die es bei der weiteren Integration der Bionik in die Ausbildung zu bewältigen gilt, sind die Interdisziplinarität und insbesondere die Nähe zu den Konvergenztechnologien. Der Bionik (im weiten Sinne) wird allgemein ein großes Zukunftspotenzial zugesprochen. Zu ihrer Verankerung an den Hochschulen empfehlen Experten die Einführung von Aufbaustudiengängen, Projektförderung sowie die Einrichtung interdisziplinärer Forschungslaboratorien. Die Etablierung grundständiger Bionik-Studiengänge scheint vonseiten der Experten die weniger bevorzugte Alternative zu sein. Nichtsdestotrotz sollte vor einer endgültigen Bewertung eine umfassende Auswertung des bestehenden Studiengangs an der Hochschule Bremen erfolgen, da dort Bionik (im engen Sinne) augenscheinlich sehr erfolgreich gelehrt wird.

5 BIONIK UND INNOVATION

5.1 Bionik im deutschen Innovationssystem
5.2 Bionische Innovationen
5.3 Treiber und Hemmnisse bionischer Innovationen am Beispiel von Optimierungsverfahren und künstlicher Photosynthese
5.4 Bionik spezifische Treiber und Hemmnisse
5.5 Perspektivische Einordnung der Bionik
5.6 Zwischenfazit Bionik und Innovationen

»Wer recht erkennen will, muß zuvor in richtiger Weise gezweifelt haben.«

ARISTOTELES, 384–322 V. CHR.

5 BIONIK UND INNOVATION

5.1 Bionik im deutschen Innovationssystem

Bedeutung von Innovationssystemen

In der Diskussion um die Fähigkeit zur Innovation und zum technologischen Wandel wurde die hohe Bedeutung herausgearbeitet, die dabei institutionellen Faktoren zukommt. Im Begriff der Innovationssysteme, in denen sich diese Prozesse des Wandels vollziehen, verbinden sich evolutorische und institutionenökonomische Aspekte (vgl. bspw. Edqvist 2001; Freeman 1987; Lundvall 1992; Nelson 1993). Die Fokussierung auf Innovationssysteme und deren Rahmenbedingungen, das heißt, auf das komplexe Zusammenspiel der Akteure mit zahlreichen Rekursionsschleifen, war eng mit der Abkehr von linearen Phasenmodellen des Innovationsprozesses verknüpft. In empirischen Vergleichen wurde festgestellt, dass institutionelle Settings und Akteursnetzwerke zwischen verschiedenen Volkswirtschaften differieren und dass dies Auswirkungen auf den makroökonomischen Innovationserfolg haben kann. Freeman (1987, S. 1) definierte Nationale Innovationssysteme (NIS) dabei als „the network of institutions in the public and private sectors whose activities and interactions initiate, import, modify and diffuse new technologies."

National

Um diese Netzwerke, bei denen Lundvall den „user-producer-linkages" eine wichtige Rolle einräumt, präziser fassen zu können, unterscheidet er zwischen einem engeren und einem weiteren Verständnis von NIS (Lundvall 1992, S. 12f.). Die engere Fassung versteht das Netzwerk als allein aus solchen Organisationen bestehend, die im Such- und Findungsprozess von Innovationen tätig sind, also vor allem Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen des privaten Sektors, Universitäten und parastaatliche technische Institute. In der weiteren Fassung werden das Produktionssystem, das Marktsystem und das Finanzsystem mit eingeschlossen. All diese Teilsysteme, so sein Argument, produzieren und reproduzieren für Innovationsprozesse relevante Umwelten. Ähnliches gilt für die staatliche Regulierung.

Regional

Auch auf regionaler Ebene sind Innovationssysteme von Bedeutung (vgl. bspw. Braczyk et al. 1998). Hier sind auch die Begriffe Cluster und innovative Milieus gebräuchlich. Ein wesentlicher Faktor dahinter ist, dass Wissens-Spillovers oft räumlich begrenzt sind (die Rede ist auch von „localised knowledge"). Das in vielen Innovationsnetzwerken nötige Vertrauen lässt sich besser durch Vor-Ort-Kontakte

herstellen. All dies betont die Bedeutung des Zusammenspiels von Akteuren im Innovationsprozess.

Nach Schumpeter ist Innovation die erfolgreiche Durchsetzung neuer Kombinationen von Existierendem und Neuem durch den Unternehmer. Anders ausgedrückt entstehen neue u. a. technologische Anwendungen durch die Verbindung der Wissensflüsse der unterschiedlichen Wissensproduzenten (F&E Einrichtungen, Produzenten, Anwender, etc.), die in Form von Netzwerken beschrieben werden können. Wie Innovationsnetzwerke für neue technologischer Ansätze, bspw. Nanotechnologien oder auch Bionik, aussehen beziehungsweise ausgestaltet werden sollten, damit sich die neuen Technologien gegenüber etablierten Trajektorien durchsetzen können und auf dem Markt erfolgreich werden, wird damit zu einer wichtigen Gestaltungsfrage, sowohl der Forschung und Entwicklung selbst als auch der Forschungspolitik und Innovationsförderung. Auf die Politik kommen damit neue Aufgaben zu, bspw. als Netzwerkinitiator, Moderator oder Förderer, um die „time to market“ Spanne zu verringern, oder auch um neue und ggf. gezielt auf nachhaltigeres Wirtschaften orientierte F&E Ansätze zu fördern (Kemp 2001, „Lead Markt Ansatz“ – Jacob et al. 2005).

Forschungs- und Innovationspolitik

Allerdings ist darauf zu verweisen, dass die Innovationsforschung die Erwartungen auf weit reichende Gestaltungsmöglichkeiten eher dämpft, indem sie die Entwicklung und Diffusion von Innovationen in zunehmendem Maße als einen komplexen und interaktiven Prozess begreift, in den eine Vielzahl von Akteuren involviert ist und der durch multiple Feedbacks charakterisiert wird. Es sei zwar deutlich erkennbar, dass institutionelle Arrangements und Akteursbeziehungen, die die Entwicklung und Diffusion von neuen Technologien beeinflussen, für Unterschiede in der ökonomischen Leistung von Ländern, Regionen und Sektoren zentral sind. Allerdings unterliegen die Muster von Innovationsprozessen selbst dynamischen Veränderungen und Innovationssysteme sind zur permanenten Anpassung an neue Herausforderungen gezwungen, wie sie etwa die Globalisierung, die sich herausbildende Wissensgesellschaft, die Verbreitung neuer generischer Technologien (bspw. IKT) und das wachsende gesellschaftliche Problembewusstsein bezüglich globaler Problemlagen bzw. der (Nicht-)Nachhaltigkeit des Wirtschaftens darstellen.

Eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten von Innovationsprozessen

Zudem sind Differenzierungen hinsichtlich der Art (technisch, organisatorisch, institutionell) und insbesondere auch der Schrittweite von Innovationen angebracht. Letzteres wird über die Unterscheidung zwischen „inkrementellen“ (kontinuierlichen) Innovationen entlang eines Trajekts und „disruptiven“ Innovationen und Pfadwechseln vollzogen. Letztere können vielfach nicht von bestehenden Innovations-

Inkrementelle und disruptive Innovationen

systemen bewältigt werden, da sie strukturell nicht in diese einbettbar sind (bspw. weil die Wissensbasis nicht verfügbar ist) oder weil der Charakter der neuen Technologien nicht zuletzt auch organisatorisch erhebliche Veränderungen voraussetzt.

Pfadabhängigkeiten

Innovationen haben also mit enormen Systemträgheiten und Pfadabhängigkeiten zu kämpfen. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass die Alternativen meist sehr viel besser sein müssen als das zu ersetzende System – und Innovationen müssen in das bestehende Innovationssystem passen. Selbst gewisse vom Kunden durchaus geschätzte „technologische Überlegenheiten und Vorteile" reichen manchmal nicht aus, dass sich die bessere Alternative auch tatsächlich durchsetzt (David 1987), sondern jene, die zu den bestehenden Innovationssystemen und Trajektorien passt.

Umgang mit radikalen Innovationen

Es ist davon auszugehen, dass die existierenden Innovationssysteme in der Regel dazu fähig sind, regelmäßig wiederkehrende, schwache Impulse wie Nachfrageänderungen, „normalen" technischen Fortschritt entlang von Trajekten oder kleinschrittige, regulatorische Anpassungen zu verarbeiten, da sie weitgehend mit den Kapazitäten ihrer bestehenden institutionellen Struktur und Wissensbasis korrespondieren. Angesichts radikalerer Innovationen, wie sie bspw. im Zusammenhang mit der Bionik immer wieder gefordert werden (genauso übrigens im Zusammenhang mit Nano- und Nanobiotechnologien), stellt sich allerdings die Frage, wie Innovationssysteme mit radikaleren, starken Impulsen oder gar Schocks umgehen können, also etwa mit technologischen Durchbrüchen, neuen Märkten, Krisen von alten Märkten oder neuen gesellschaftlichen Bedürfnissen, deren Bearbeitung nicht nach inkrementellen, sondern nach radikalen oder Systeminnovationen verlangt. Solche starken Impulse erfordern oftmals mehr als nur Anpassungen in existierenden Systemen, sondern ggf. auch die Schaffung von neuen (Sub-)Systemen.

Besonderheiten des deutschen Innovationssystems

Auch wenn Aussagen auf dieser allgemeinen Ebene mit Vorsicht zu behandeln sind, wird doch immer wieder darauf hingewiesen, dass das deutsche „nationale Innovationssystem" immer noch in starkem Maße geprägt ist durch Industrien und Technologien der zweiten industriellen Revolution, also die Chemie, den Maschinenbau und die Automobilindustrie (vgl. Grupp et al. 2002). Chemie und Automobilindustrie sind zudem geprägt durch zentrale Großunternehmen und zum anderen durch zumeist kleinere Zulieferer. Als typisch für das nationale Innovationssystem in Deutschland wird des Weiteren oft die ingenieursorientierte Kompetenz betont. Die genannten Kernkompetenzen des deutschen Innovationssystems basieren dabei in starkem Maße auf die vielfach traditionellen technisch ökonomischen Trajektorien. Verände-

rungen der Innovationsrichtungen und insbesondere disruptive Innovationen können evtl. in die Trajekte integriert werden – wie das bspw. bei der Informationstechnik (meist) der Fall war – können aber auch zur Infragestellung der bestehenden Trajektorien führen.

Die Beharrungskräfte des nationalen Innovationssystems sind vielfach herausgearbeitet worden (bspw. Wieland 2006, Wengenroth 2006) und auch die Berichte zur technologischen Leistungsfähigkeit kommen zu dem Ergebnis, dass Deutschland im Bereich der Hochtechnologien gewisse Rückstände zu verzeichnen hat. Des Weiteren wird darauf verwiesen, dass die Einführung neuer Technologien in Deutschland vor spezifischen Hemmnissen stand bzw. immer noch steht. Dies betraf insbesondere solche Bereiche, die nicht hinreichend in das deutsche System passten, wie bspw. die Bio- und Gentechnologien, zu deren Integration sich insbesondere das „chemische Paradigma" der Pharmaindustrie (nicht allein in Deutschland) als nur begrenzt fähig erwiesen hat.

»general purpose technologies«

Bei den IKT sowie den Bio- und Gentechnologien handelt es sich um Querschnittstechnologien („general purpose technologies" – Bresnahan/Trajtenberg 1996), die in einer Vielzahl von Bereichen einsetzbar sind und damit in erheblichem Umfang zu Wandlungsprozessen beitragen können. Gegenwärtig sind es insbesondere die Nanotechnologien (Nanobiotechnologien) von denen vergleichbare Innovationswirkungen erwartet werden. Diese „general purpose technologies" kommen in vielen Sektoren bzw. Branchen zum Einsatz und sind wesentlich dezentraler als bspw. die Energietechnik (Kernenergie) oder die Luft- und Raumfahrttechnik. Diese „Dezentralität" erfordert neue Formen der Forschungs- und Technologie- bzw. Innovationsförderung, die sich weniger auf die öffentliche Förderung einzelner Technologielinien konzentrieren können. Sie müssen vielmehr die Suchprozesse optimieren und offen halten, um frühzeitige Schließungsprozesse zu vermeiden. Ein aktuelles Lernfeld ist derzeit die Förderung der Nanotechnologien, genauer die Förderung von Innovationen basierend auf den Nanotechnologien.

Bionik und Techno-Wissenschaften

Typisch für die Bio- und Gentechnologie, für Informatik, Nanotechnologie und eben auch Bionik ist die Gleichursprünglichkeit und besonders enge Verwobenheit von technischer und wissenschaftlicher Entwicklung. Die Bionik unterscheidet sich jedoch von diesen „Techno-Wissenschaften" insbesondere durch ihren emotionalen und normativen Gehalt. Im Unterschied zur Gentechnologie wird die Bionik in keiner Weise als gefährdend für Mensch oder Natur angesehen. Was wohl in erster Linie darauf zurückzuführen ist, dass bei bionischen Ansätzen eher versucht wird, die Natur nachzuahmen, statt sie von der

synthetischen Chemie bis hin zur synthetischen Biologie quasi „neu zu erfinden“. Die möglichen Argumente für und wider diese verbreiteten (Vor-)Urteile wurden an anderer Stelle bereits ausführlich dargestellt (vgl. Kapitel 2).

› s. Kapitel 2

Veränderungen in der Technologie- und Innovationspolitik

Die Technologie- und Innovationsförderpolitik hat sich spätestens seit den 90er Jahren nicht allein in Deutschland deutlich verändert. Gründe dafür sind u. a. 1) die zunehmende Internationalisierung von Forschung und Unternehmen, 2) die zunehmende Bedeutung der Forschung und Entwicklung (Wissen) für die wirtschaftliche Entwicklung, 3) die Veränderung der Struktur der für Innovationen und Wettbewerbsfähigkeit als wesentlich eingeschätzten Technologiefelder, von „Großtechnologien“ zu eher querschnittsorientierten Technologien (IT, Biotechnologien, Nanotechnologien etc.), 4) das tendenzielle Verschwimmen der Grenzen zwischen Grundlagen- und Anwendungswissen, und nicht zuletzt 5) die zunehmende Multidisziplinarität und Heterogenität der Wissensgenerierung und Technikentwicklung. Die Innovationspolitik hat darauf mit der Förderung sogenannter Schlüsseltechnologien und High Tech Cluster (z. T. regional) reagiert sowie durch die Öffnung der F&E Landschaft zur Verbesserung ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit und Attraktivität (vgl. Dolata 2004).

5.2 Bionische Innovationen

Bisher eher begrenzte Innovationserfolge aus der Bionik

Im Rückblick ist hinsichtlich der bisherigen wirtschaftlich-technischen Erfolge der Bionik eher Zurückhaltung geboten. Es gibt ohne Zweifel große Erfolge, angefangen vom Flugzeugflügel über „winglets“, den Klettverschluss („velcro“), den Laufroboter, bis hin zum so genannten „Lotuseffekt“. Die Beispiele für (erfolgreiche) bionische Produkte sind allerdings durchaus überschaubar (vgl. Tabelle 12 in Kapitel 1) und bei dem einen oder anderen Innvationserfolg gibt es noch Debatten darüber, inwieweit bei der jeweiligen Lösung tatsächlich von der Natur gelernt wurde (bspw. Velcro) (vgl. Vincent et al. 2006, S. 473).

› s. Kapitel 4, Tab. 12

Viele Innovationen (z. B. aus dem Automobilbereich) sind auch im Wesentlichen inkrementeller Art (Verbesserungsinnovationen). Es geht um Optimierungen in bestimmten Teilbereichen des Automobils, angefangen von Designoptimierung bis hin zum Reifenprofil. Ähnliches gilt auch für die Informations- und Kommunikationstechnik. Etliche Projekte mit hoher öffentlicher Aufmerksamkeit, wie die technische Umsetzung der Haifischhaut für strömungsoptimierte und Anti-Haft-Oberflächen oder die nach dem Vorbild von Vogelflügeln konstru-

ierten Rotorblätter des „Berwian"-Windrads, konnten sich bislang überhaupt nicht durchsetzen. Die Gründe für die Nicht-Übernahme dieser bionischen Lösungsansätze sind bisher nicht systematisch analysiert worden.[115]

In Tabelle 14 findet sich ein Überblick über eine Auswahl von verfolgten bionischen Ansätzen, die in der entsprechenden Literatur dokumentiert sind. Wir beschränken uns dabei auf den Bereich der „Bionik im engen Sinne", also auf den Bereich, bei dem sich die Akteure direkt auf Bionik oder Biomimetik beziehen. Die Aufstellung erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit.[116] Sie soll lediglich einen Eindruck davon vermitteln, in wie vielen Bereichen bionische Innovationen angesiedelt sind und welches Innovationsstadium sie bisher jeweils erreichen konnten.

Schwierigkeiten der Durchsetzung bionischer Innovationen

Viele Entwicklungen aus der Bionik, welche in der wissenschaftlichen und populären Literatur beschrieben werden, sind – teilweise seit einigen Jahrzehnten – nicht über das Stadium der Forschung und Entwicklung hinausgekommen bzw. abgebrochen worden. Viele der umfassenden Bionik-Publikationen zeigen insofern eher gute Vorbilder für potenzielle Lösungen bisher ungelöster (bzw. nur unzureichend gelöster) technischer Probleme als tatsächlich umgesetzte Innovationen (so bspw. Bar-Cohen 2006, Küppers/Tributsch 2002; Nachtigall 2002; Greguss 1988; Zerbst 1987; Heynert 1976; Gérardin 1972). Auf die Innovationshemmnisse wird in diesem Zusammenhang eher selten eingegangen. Allenfalls wird auf die Schwierigkeit hingewiesen, Unternehmen für diese Lösungen zu interessieren oder auf eine „konservative" Ingenieurtradition. Die Erklärungsversuche verbleiben also eher auf der „personalen bzw. narrativen Ebene".

Treiber und Hemmnisse im Allgemeinen

Vor allen einzelfallbezogenen Erklärungsversuchen muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass als die wichtigsten Treiber und Hemmnisse für bionische Innovationen zunächst einmal diejenigen identifiziert werden sollten, die als Treiber und Hemmnisse für jegliche Innovationen bekannt sind. Innovationen werden grundsätzlich von zwei Faktoren beeinflusst: der Entwicklung neuer (nicht nur) technischer Möglichkeiten („technology push") auf der einen und einem bestimmten Nachfragesog („demand pull") auf der anderen Seite.

---

115 Auch im Rahmen dieser Studie mussten wir uns auf die geplanten Fallstudien konzentrieren, bei denen eher „nach vorne" geschaut werden sollte. Insofern war auch eine Evaluation der bisherigen Bionik(projekt)förderung weder intendiert noch möglich.

116 Einen weiteren Einblick in die Innovationsaktivitäten aus der Bionik geben bspw.: Bar Cohen (2006), Rossmann/Tropea (2005), Boblan/Bannasch (2004), Nachtigall (2002), Gleich (2001). Schließlich finden sich in Tabelle 12 (Kapitel 4.3), in welcher die deutschen Unternehmen mit Aktivitäten im Bereich Bionik gelistet sind, weitere Hinweise auf unterschiedliche Innovationen und deren Innovationsreife.

Tabelle 14 — Beispiele bionischer Entwicklungen und ihre Innovationsreife [eigene Zusammenstellung]

Bionischer Ansatz	Innovationsstadium (Jahr)	Fundstelle (nicht unbedingt ein Hinweis auf den Innovateur!)
Selbstreinigende Oberflächen nach der Struktur der Oberflächenstruktur von Lotusblättern	Marktdiffusion verschiedener Farben und Lacke (seit 1999)	Küppers (2004:320)
Strömungswiderstand mindernde Oberflächen nach der Struktur der Delfinhaut	Marktvorlaufprodukt vorhanden (ca. 2004)	Küppers (2004:320)
Strömungsoptimierte Rohrkonstruktionen nach dem Vorbild von Flussmäandern	Industrielle Testphase (ca. 2004)	Küppers (2004:320)
Strömungs- und gewichtsoptimiertes Auto: äußere Form nach dem Vorbild des Kofferfischs, Karosseriebauteile optimiert nach Wachstumsprozessen von Knochen und Bäumen	Konzeptionsphase, Forschung und Entwicklung (ca. 2005)	Internetseite Daimler/Chrysler (2005)[117]
Laufmaschine mit Beinen statt der üblichen Räder/Ketten für Waldarbeiten	Prototyp, Testphase (1995)	Nachtigall (2002:190)
Strömungswiderstand mindernde Folie für Flugzeuge und Boote nach der Struktur der Haihaut	Testphase (1990er Jahre), danach keine Weiterentwicklung in diesem Bereich Markteinführung bei Schwimmanzügen	Cerman *et al.* (2005:206ff)
Winglets besonders geformte Flügelenden von Flugzeugtragflächen nach dem Vorbild von Vogelflügeln	Im Markt etabliert (seit Ende der 1980er Jahre)	Cerman *et al.* (2005:171f)
Schlagflossenantriebe für Unterwasserfahrzeuge nach dem Vorbild der Fische	Forschung und Entwicklung, erste Prototypen (seit 1905)	Nachtigall (2002: 49ff); aktuell: Bandyopadhyay, (2005)
Computer gestützte Methode zur Gewichts- und Stabilitätsoptimierung bei der Konstruktion von Bauteilen nach dem Wachstumsprinzip von Bäumen und Knochen CAO/SKO	Am Markt etabliert	Nachtigall (2002:374ff)
Selbstschärfende Schneidewerkzeuge nach dem Vorbild von Rattenzähnen	Forschung und Entwicklung, Prototypen (2006)	Szentpétery (2006:66)

117 Siehe Internetseite der DaimlerChrysler AG unter: http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7154-49-503504-1-0-0-503518-0-0-8-10736-0-0-0-0-0-0-0.html (Stand: 18.02.2007).

Bionischer Ansatz	Innovationsstadium (Jahr)	Fundstelle (nicht unbedingt ein Hinweis auf den Innovateur!)
Hochhäuser nach dem Vorbild von Pflanzenstrukturen	Konzeption (2006)	Gaffron (2006)
Algorithmen nach dem genetischen Evolutionsprinzip zur Optimierung von Reifenprofilen	Forschung und Entwicklung, abgebrochen (ca. 2006)	Honsel (2006)
Unterwasserkommunikationssysteme nach dem Vorbild der Delfinkommunikation	Forschung und Entwicklung, Markteinführung (ca.2006)	Szentpétery (2006:66); Bannasch/Yakovlev (2006)
Selbstreparierende Schaumbeschichtung für Leichtbautragwerke nach dem Vorbild von Lianen	Forschung und Entwicklung (2006)	Szentpétery (2006:64)
Taktile Sensoren für Roboteranwendungen nach dem Vorbild verschiedener Sinnesorgane verschiedener Tiere	Forschung und Entwicklung (ca. 2005)	Dargahi/Najarian (2005)
Optische Sensoren für die Navigation von Flugzeugen nach dem Vorbild der Facettenaugen von Insekten	Forschung und Entwicklung (ca. 2005)	Ruffier/Franceschini (2005)

Beide Faktoren müssen zusammen kommen, damit überhaupt Innovationen entstehen und sich durchsetzen können. Zusätzlich wirken die staatliche Regulation, die Wettbewerbsbedingungen auf den einschlägigen Märkten sowie – mit Blick auf die Möglichkeiten zur Innovation – die Pfadabhängigkeiten auf der einen und die Gelegenheitsfenster auf der anderen Seite (Dosi 1982; Sartorius et al. 2005; Jacob et al. 2005). Das heißt, wenn Innovationen aus der Bionik entweder erfolgreich oder nicht erfolgreich sind, dann besteht eine (sogar recht hohe) Wahrscheinlichkeit, dass der Erfolg oder Misserfolg wenig mit dem bionischen Ursprung oder Charakter der Innovation zu tun hat. Meist sind es Pfadabhängigkeiten, die dazu führen, dass sich Innovationen häufig nicht durchsetzen können, selbst wenn sie bestehenden Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen deutlich überlegen sind. Die zu ersetzenden Technologien sind in Systeme eingebunden, die sich um sie herum gebildet oder an sie angepasst haben. Die damit einhergehenden Systemträgheiten können nicht so ohne weiteres überwunden werden.

Einflussfaktoren auf Innovationen

Trotzdem macht es natürlich Sinn nach Bionik spezifischen Hemmnissen zu suchen. Vor dem Hintergrund unserer Kennntis des Feldes, der Interviews, Workshops und vor allem der Fallstudien lassen sich folgende Hypothesen bezüglich Bionik spezifischer Innovations- bzw.

Bionik spezifische Hemmnisse

Transferhemmnisse formulieren. Da sind zunächst Probleme, die sich auf die Problematik der Übertragung (also auf den bionischen Abstraktionsprozess) beziehen. So ist z.B. die Hoffnung auf Vorbilder für Ressourceneffizienz einerseits sicher berechtigt, andererseits muss auch sicher gestellt sein, dass Übereinstimmungen bestehen hinsichtlich der jeweiligen „Knappheiten". Ökosysteme bzw. die Evolution optimieren ggf. hinsichtlich anderer Knappheiten als Industriesysteme. Auch die Hoffnung auf ökologische bzw. evolutionäre Optimiertheit biologischer Lösungen hat ihre Berechtigung. Es muss aber sicher gestellt sein, dass die Optimierungsparameter hinsichtlich folgender Aspekte einigermaßen übereinstimmen:

a. Sicherheit: Das Individuum zählt nicht im Evolutionsprozess. Das können (und wollen) wir uns bei der technischen Gestaltung und bei der Sicherheitsauslegung technischer Systeme auf keinen Fall leisten.
b. Systemstabilität vs. Anpassungsfähigkeit: Die Organismen sind den dauernden Umgebungsveränderungen mehr oder minder ausgeliefert. Die Fähigkeiten der Menschheit zur Gestaltung und Fixierung (technischer) Umwelten sind sehr viel größer.

Bedeutung des vorherrschenden Produktionsparadigmas

Im Verhältnis zwischen (mechanisch vorgegebener) Systemstabilität und Anpassungsfähigkeit könnte sich allerdings derzeit ein Paradigmenwechsel in Richtung auf eigensicherere, robustere und resilientere technische Systeme andeuten. In längerfristiger Betrachtung wird auch das „lock in" in ein ausgesprochen erfolgreiches Paradigma eine Rolle spielen. Lange Zeit wurde das industrielle Produktionsparadigma bestimmt durch das mechanistische Weltbild und eine sich daran orientierende mathematisch-experimentelle Naturwissenschaft (bspw. beliebige Wiederholbarkeit als Erfolgskriterium experimenteller Wissenschaft). Dies könnte sich aktuell ändern in Richtung auf einen angemesseneren „Umgang mit komplexen Systemen". Und schließlich düften auch kulturelle Schranken zwischen wissenschaftlichen Schulen bzw. Herangehensweisen zwischen disziplinärem und interdisziplinärem Arbeiten, zwischen Reduktionismus und den Systemwissenschaften (Ganzheitlichkeit) eine Rolle spielen. Immerhin können einige dieser Thesen auch so gedeutet werden, dass in dieser Hinsicht die Bionik mit einigen ihrer bisherigen Ansätze nur „zu früh" dran war bzw. ist.

Auch bei kurzen Einzelfallbetrachtungen können diese vergleichsweise abstrakten Thesen durchaus eine Rolle spielen. Wenn man sich bspw. fragt, warum das viel zitierte Bionikbeispiel „künstliche Haifischhaut" zur Reduktion des Luftwiderstands im Flugzeugbau bisher

noch nicht über einige (auch schon wieder Jahre zurück liegende) Testflüge hinaus gekommen ist, sind einige wichtige Gründe nahe liegend. Es gibt technische Probleme, bspw. wie eine auf den Flugzeugrumpf aufgebrachte Folie die extremen Anforderungen (bspw. Temperaturschwankungen zwischen -30 bzw. -50° C in großen Höhen und über 70° C in der Sonne auf südlichen Flughäfen) ohne Probleme übersteht, dass die Mikrostrukturen verdrecken und sich zusetzen und damit ggf. der gewünschte Effekt verlorengeht oder dass die Kontrollierbarkeit der Flugzeugoberfläche hinsichtlich Rissbildung extrem sicherheitsrelevant ist (Reinigung, Rissprüfung mit vollständiger Entlackung nach bestimmten Flugleistungen). Schließlich ist möglicherweise der Preis für das steuerfreie Kerosin immer noch so niedrig, dass sich der Aufwand für den erzielbaren Einspareffekt einfach ökonomisch nicht lohnt. Ähnliche Gründe lassen sich auch anführen zur Erklärung, warum sich bspw. die von Videler schon 1992 für Fokker entwickelten bionischen Rumpfformen für Flugzeuge nicht durchsetzen konnten (vgl. Biona-Report 8, 1992). Neben der „Gewöhnungsbedürftigkeit" dürften fertigungstechnische Gründe eine zentrale Rolle gespielt haben. Es ist einfach wesentlich einfacher und günstiger standardisierte Rohrsegmente zu produzieren und aneinander zu fügen und diese dann vorne und hinten abzurunden, als ständig wechselnden Durchmessern und dreidimensionalen Neigungen zu folgen. Auch hier dürfte der aktuelle Kerosinpreis nicht ausreichen, um diesen fertigungstechnischen Nachteil wettzumachen.

Das Beispiel Riblet-Folie

5.3 Treiber und Hemmnisse bionischer Innovationen am Beispiel von Optimierungsverfahren und künstlicher Photosynthese

Die Publikations-, Patent- und Netzwerkanalyse (vgl. Kapitel 3 und 4) und ein Blick in die einschlägige Überblicksliteratur (vgl. bspw. Bar-Cohen 2006; Nachtigall 2002) haben gezeigt, dass die Bionik sich als breites und heterogenes Feld darstellt und zwar sowohl mit Blick auf die engere Community, die sich mit den Begriffen Bionik und Biomimetik identifiziert („Bionik im engen Sinne"), als auch mit Blick auf ein breiteres Verständnis des „Lernens von der Natur". Bionik-Forschung wird in einer großen Anzahl von Disziplinen betrieben und zwar mit und ohne direkten Bezug zum Begriff der Bionik. Dies war auch die Ausgangslage für die Auswahl der Kurzfallstudien zur Identifikation und Bewertung gegenwärtiger und zukünftiger bionischer Trends und Potenziale (vgl. Kapitel 3.2).

› s. Kapitel 3 und 4

Bionik: Ein heterogenes Feld

› s. Kapitel 3.2

Vertiefungsfallstudien: »Optimierungsverfahren« und »künstliche Photosynthese«

Die Vertiefungsfallstudien zu den „Optimierungsverfahren“ und zur „künstlichen Photosynthese“ legten im Unterschied dazu verstärkt den Fokus auf Innovationsprozesse in der Bionik. Neben den Trends und Potenzialen der Bionik ging es hier vor allem um spezifische Treiber und Hemmnisse für bionische Innovationen. In den Kurzfallstudien (Kapitel 3.2) hatte sich der erste Eindruck bestätigt, dass zwar in vielen Bereichen seit längerem Bionik-F&E betrieben wird, erfolgreiche Innovationen jedoch eher die Ausnahme bilden. Daher stellte sich für die vertiefenden Fallstudien insbesondere die Frage nach den Ursachen für den Erfolg oder Misserfolg von Innovationen aus der Bionik. Zwei Vertiefungsstudien wurden speziell unter dieser Fragestellung durchgeführt. Zum einen wurde das Feld der naturanalogen (bionischen) Optimierungsverfahren ausgewählt,[118] und zwar sowohl mit einem Ansatz, der sich auf die technologische Leistungsfähigkeit dieser Verfahren konzentrierte (im Sinne eines „technology push“ als Innovationstreiber), als auch mit einem Ansatz, der sich auf die Nachfragesituation im ausgewählten Gebiet der Logistik konzentrierte (im Sinne eines „demand pull“ als Innovationstreiber). Eine tiefer gehende Analyse sowohl der technischen Möglichkeiten als auch der Bedarfslagen sollte Aufschluss darüber geben, weshalb sich gerade bei den Optimierungsverfahren bionische Lösungen zumindest in Forschung und Entwicklung vergleichsweise gut etablieren konnten, während aber trotzdem vergleichsweise wenig unternehmenspraktische Erfolge bekannt werden. Die zweite Vertiefungsstudie widmete sich mit dem Thema „künstliche Photosynthese“ den Ansätzen einer bionischen Energiewandlung und -nutzung.

› s. Kapitel 3.2

Innovationsprozesse in der Bionik

»technology push« und »demand pull«

Bionische Optimierungsverfahren in der Logistik

Die Kurzfallstudie „Logistik“ hat gezeigt, dass in der Logistik bisher kaum Ansätze aus der Bionik zur Anwendung kommen. Dieses Ergebnis war insofern interessant, als ja gerade die Logistik ein typisches Anwendungsgebiet für Optimierungsverfahren darstellt. Diesem Aspekt ist deshalb im Zuge der entsprechenden Vertiefungsfallstudie besondere Beachtung geschenkt worden. Dabei ergab sich hinsichtlich der aktuellen Bedeutung, der Dynamik und des zukünftigen Potenzials

118 Auch hier bestätigte sich der Befund, dass Bionik-F&E oft unter fallspezifischen Begriffen betrieben wird. Im Falle der Optimierungsverfahren sind dies bspw. Begriffe wie „naturanaloge Verfahren“, „Genetische Algorithmen“, „Particle Swarm Optimisation“ oder „Evolutionsstrategie“. Selbst der Begründer der „Evolutionsstrategie“, Prof. Rechenberg von der TU Berlin, grenzt in der Bezeichnung seines Lehrstuhls „Bionik und Evolutionsstrategie“ das von ihm mitentwickelte Optimierungsverfahren begrifflich von der Bionik ab. Trotzdem bleibt klar erkennbar, dass es sich um Ansätze handelt, die auf natürliche bzw. biologische Phänomene zurückgehen. Genetische Algorithmen ahmen das Verhalten bzw. die Funktionsweise von Genen nach, Particle Swarm Optimisation orientiert sich am Schwarmverhalten von Tieren, bspw. Vögeln, Insekten oder Fischen, und die Evolutionsstrategie überträgt den evolutionären Entwicklungs- und Optimierungsprozess auf technische Konstruktionsprozesse.

Bionische Optimierungsverfahren

bionischer Optimierungsverfahren – dies sind in erster Linie bioanaloge Optimierungsverfahren wie bspw. die Evolutionstechnik (Rechenberg/Schwefel), die evolutionären Algorithmen, Schwarmintelligenz (Ameisenalgorithmus) und die von Mattheck entwickelten Verfahren zur Bauteiloptimierung (CAO, SKO) – ein ziemlich unübersichtliches Bild. Das mag insbesondere damit zusammenhängen, dass sowohl die Verfahren selbst als auch die jeweiligen Anwendungssituationen (bzw. die jeweils zu lösenden Optimierungsprobleme) so heterogen sind, dass ein Vergleich sowohl der bioanalogen Verfahren untereinander, als auch der Vergleich dieser mit nicht bioanalogen, konkurrierenden Ansätzen, schlicht nicht möglich erscheint. Die bekanntesten bioanalogen Verfahren werden augenscheinlich breit angewendet, auch wenn diese Anwendungen z. T. nicht immer gut dokumentiert sind. Eine besonders hohe wissenschaftliche Dynamik und Fruchtbarkeit ist derzeit weder bei den bioanalogen noch bei den konkurrierenden Verfahren zu erkennen. Aufgrund der stetig zunehmenden Komplexität in der Wirtschaft und vor allem auch in der Logistik hätten wir hier eigentlich mehr erwartet. Interviewpartner aus der Logistik erklärten diese Situation mit einem derzeit noch zu schwachen Problemdruck (bzw. einer zu schwachen Problemwahrnehmung). Die Unternehmen könnten ihre (Optimierungs-)Probleme derzeit noch mit einfacheren Mitteln lösen und hätten eine gewisse Zurückhaltung mit Blick auf die nötigen Einarbeitungszeiten in komplexere Verfahren. Diese eher zurückhaltende Einschätzung des Markterfolges bionischer Ansätze bezieht sich allerdings auf die aktuelle Situation, in der sich die bionischen Verfahren erst am Anfang der Entwicklung befinden und die bestehenden Verfahren ihre Optimierungspotenziale ausspielen können. Mit Blick auf die auch auf Rechenberg zurückgreifenden Ansätze bspw. des Organic Computing (Müller-Schloer 2005) wird aber auch deutlich, dass im IuK Bereich ein umfassender Paradigmenwechsel ansteht, der nicht zuletzt auf Grund des Problemdrucks im IuK Bereich (zunehmende Komplexität und zunehmender Aufwand) sich den Weg bahnen wird. Die Marktfähigkeit entsprechender Systeme ist allerdings erst mittelfristig zu erwarten.

Derzeit noch schwache Nachfrage nach bionischen Optimierungsverfahren in der Logistik

»Künstliche Photosynthese«

Auch das Thema Energiegewinnung und -nutzung spielt innerhalb der einschlägigen Bionik-Literatur seit Jahrzehnten eine prominente Rolle und trotzdem sind auch auf diesem Gebiet bisher nicht besonders viele Ansätze bzw. Erfolge zu verzeichnen, die über das Stadium der Grundlagenforschung hinaus gekommen sind. Die „künstliche Photosynthese“ ist ein Forschungsziel, in dem eine Vielzahl von verschiedenen Ansätzen verfolgt werden, die sämtlich darauf ausgerichtet sind, den natürlichen Photosyntheseprozess und dessen zugrundeliegenden

Strukturen und Mechanismen zu verstehen und technisch umzusetzen. Auch hier finden wir eher selten die Begriffe „Bionik“ oder „Biomimetik“, eine Orientierung am Vorbild Natur ist aber unübersehbar.

Vergleich verschiedener bionischer Innovationsprozesse

Bei der Energiegewinnung und -nutzung haben wir es im Unterschied zum Verhältnis von Optimierungsverfahren und Logistik eher mit der Situation zu tun, dass der „Demand-Pull-Faktor“, der Bedarf an Alternativen, sehr viel stärker ist als die Fähigkeiten zur Entwicklung bionisch-technischer Lösungsansätze. Während bei den Optimierungsmethoden eher der Anschein entsteht, dass die bionischen Lösungen noch unzureichend nachgefragt werden, stößt bei der Energie der „Technology Push-Faktor“ an seine Grenzen, weil die Entwicklung entsprechender Lösungen (Stichwort: „künstliche Photosynthese“) einfach sehr viel länger dauert, als man sich das ursprünglich vorgestellt hatte. Auch dieser Befund sollte keineswegs als „vernichtendes Urteil“ für die Bionik betrachtet werden. Wir begegnen ihm vielmehr in fast allen Bereichen von besonders forschungs- und technologieintensiven (High-Tech) Innovationen. Man erinnere sich nur an das bio- bzw. gentechnologische Projekt einer Verankerung der Fähigkeit zur biologischen Stickstofffixierung in weiteren Nutzpflanzen. Wir sind diesbezüglich offenbar heute von einer Lösung noch genauso weit entfernt wie zur Zeit der ersten großen öffentlichen Vermarktung dieses Vorhabens Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts.

Anwendungsreife bionischer Innovationen

Auch hinsichtlich der Anwendungsreife unterscheiden sich die Optimierungsverfahren und die bionische Energiewandlung deutlich voneinander. Einige der naturanalogen Optimierungsverfahren können als gut etabliert gelten. Im Bereich der bionischen Energiewandlung konnten hingegen kaum Ansätze identifiziert werden, die sich bereits in der Anwendung befinden. Lediglich die Farbstoff basierten Solarzellen – deren Status als bionische Technologie nicht unumstritten ist – scheinen kurz vor der Markteinführung zu stehen. Alle anderen Ansätze bionischer Energiewandlung befinden sich derzeit noch ausschließlich im Bereich der Grundlagen- und der Angewandten Forschung.

Bionische Innovationen spielen eine begrenzte Rolle in der Logistik

Auf beiden Feldern scheinen die bionischen Ansätze eine untergeordnete Stellung einzunehmen. Das bedeutet aber nicht, dass sie unbedeutend sind. Insbesondere im Fall der Optimierungsverfahren hat sich gezeigt, dass die bionischen Verfahren in Bereichen Anwendung finden, in denen konventionelle Ansätze entweder zu keinen oder zu weniger guten Lösungen führen. Das Feld der Optimierungsverfahren ist nämlich gekennzeichnet durch eine relativ hohe Spezifität der Optimierungsprobleme. Das heißt, dass ihre Leistungsfähigkeit kaum allgemein vergleichend zu beurteilen ist, weil sich die Optimierungsprobleme teilweise extrem voneinander unterscheiden und somit nur

von sehr problemspezifischen Optimierungsverfahren bewältigt werden können. Wenn also bionische Optimierungsverfahren quantitativ gesehen nicht so stark verbreitet sind wie konventionelle Verfahren, so kann dies damit zusammenhängen, dass zumindest die bisher auftretenden Optimierungsprobleme noch völlig zufriedenstellend durch konventionelle Verfahren gelöst werden können. Zumindest die Logistikstudie kommt zu dem Schluss, dass einige spezifische Leistungen der naturanalogen Optimierungsverfahren (bisher) nicht im großen Umfang nachgefragt werden, dass aber einiges dafür spricht, dass sich dies mit zunehmender Komplexität der logistischen Problemlagen ändern wird. Die naturanalogen Optimierungsverfahren haben Stärken bei Optimierungsproblemen von mittlerer bis hoher Komplexität. Die bisher vorherrschenden Optimierungsprobleme in der Logistik weisen jedoch nur eine niedrige bis mittlere Komplexität auf und sind daher durch mathematisch-analytische Verfahren leichter, schneller und exakter zu lösen. Geht man jedoch davon aus, dass die Komplexität der Optimierungsprobleme in der Logistik zunehmen wird, besteht Grund zur Annahme, dass auch bionische Optimierungsverfahren in der Logistik eine vermehrte Verbreitung erfahren werden.

Bionische Optimierungsverfahren in Zukunft von größerer Bedeutung

Wir hatten eingangs darauf hingewiesen, dass sich die Nachfragesituation im Bereich der Energiewandlung stark von der bei den Optimierungsverfahren unterscheidet. Die Nachfrage nach Alternativen zu den konventionellen, auf der Nutzung fossiler Rohstoffe beruhenden Energietechnologien hat allerdings erst in jüngerer Zeit angezogen. Energietechnologien auf Basis regenerativer Energieträger haben derzeit nur mithilfe staatlicher Unterstützung eine Chance, sich am Markt zu etablieren. Auch wenn also der Nachfragesog noch lange nicht so stark ist wie derzeit, liegt der Engpass bei bionischen Energiewandlungstechniken viel stärker auf der Technologieseite, also bei der Entwicklung realisierbarer (dauerstabiler) bionischer Lösungen nach dem Vorbild der Photosynthese.

Bionische Verfahren im Energiebereich gewinnen an Bedeutung

Die Energieversorgung ist allerdings, das muss hier ausdrücklich bemerkt werden, geprägt durch immense Pfadabhängigkeiten. Das gegenwärtige Energiesystem fußt nämlich fast vollständig auf der Nutzung fossiler Brennstoffe. Technologien zur Energiewandlung und -nutzung, wie bspw. Kohlekraftwerke oder Verbrennungsmotoren in Autos, waren selbst einmal (Basis-)Innovationen und haben sich über Jahrzehnte etabliert und weiterentwickelt (inkremenentelle Innovationen). Um diese Technologien herum sind Infrastrukturen (Tankstellen, Werkstätten), aber auch institutionelle Gefüge (Abgasnormen, Sicherheitsprüfungen) entstanden, die letztlich zu einer Verfestigung dieser Technologiepfade geführt haben. Alternative Technologien zur

Energiesystem geprägt von starken Pfadabhängigkeiten

»sunk costs«

Energiewandlung und -nutzung, wie bspw. Wasserstoff betriebene Blockkraftwerke oder Elektromotoren für Autos, mögen in vielerlei Hinsicht den etablierten Technologien überlegen sein. Das Verlassen der „alten“ Technologiepfade wird jedoch durch die bestehenden Infrastrukturen, institutionellen Gefüge und andere gesellschaftliche Strukturen erschwert, weil es mit dem Verlust der Investitionen in diese Infrastrukturen verbunden wäre („sunk costs“). Die neuen, innovativen Technologien hingegen stehen vor dem umgekehrten Problem, dass noch keine essentiellen unterstützenden Strukturen vorhanden sind. Ein Versorgungsnetz für Wasserstoff bspw. müsste erst noch geschaffen werden, was u. a. hohe Investitionen erfordert. Selbst wenn also inzwischen ein deutlicher Nachfragesog existiert und selbst wenn die Farbstoff basierten Solarzellen oder andere organische Solarzellen schon betriebsreif auf dem Markt wären, würde sich die Durchsetzung dieser Innovationen als langwierig herausstellen.

Bionische Solarzellen teilweise schon marktnah

(Bionische) Solarzellen müssten, um sich als Innovationen breit durchsetzen zu können, einerseits einen im Verhältnis zu bestehenden Energiegewinnungstechnologien überdurchschnittlich hohen Nutzen aufweisen. Andererseits müsste die Nutzung der konventionellen Technologien zur Energiegewinnung an Grenzen bzw. auf Hemmnisse stoßen, die ein Verlassen dieses etablierten Technologiepfades attraktiver oder gar notwendig werden lassen. Für beide Bedingungen gibt es durchaus Anzeichen, sie werden jedoch erst mittel- bis langfristig durchschlagen. Zum einen versprechen solare Energiewandlungstechnologien eine risikoärmere, vielseitigere und flexiblere Art der Anwendung. Bionische Solarzellen wären, wie die Photosynthese betreibenden Pflanzen und Bakterien, in der Lage, auch diffuses Licht sehr effizient und vor allem im Niedertemperaturbereich zu nutzen. Sie zeichnen sich durch eine kleine Bauweise und geringes Gewicht aus, so dass sie bspw. in Fassaden, tragbare Geräte oder sogar Textilien integriert werden könnten.

5.4 Bionik spezifische Treiber und Hemmnisse

Merkmale bionischer Innovationen

Trotz der generellen Überlagerung durch die allgemein wirksamen Treiber und Hemmnisse für Innovationen konnten im Zuge der Vertiefungsfallstudien auch solche Bedingungsfaktoren identifiziert werden, die speziell bei bionischen Innovationen wirksam sind. Als generelles Merkmal bionischer Innovationen kann gelten, dass im Forschungs- und Entwicklungsprozess der Innovation in irgendeiner Form ein Lernen von der Natur (bzw. von den Erkenntnissen der Naturwis-

senschaften insbesondere der Biologie) stattgefunden hat. Das heißt, Erkenntnisse über biologische Sachverhalte sind in technische Anwendungen übertragen worden. Dieser Übertragungsprozess gestaltet sich jedoch nicht bei allen Innovationen aus der Bionik gleich, sondern unterscheidet sich von Fall zu Fall und wirkt sich dabei auch auf den Innovationsprozess insgesamt aus.

Der bionische Übertragungsprozess

Unterschiede bestehen dabei hinsichtlich der Komplexität der Prozesse und Strukturen, die als Vorbild dienen. Die Mechanismen derer sich beispielsweise Ameisen bedienen, um im Kollektiv schnell und flexibel den kürzesten Weg zwischen ihrem Nest und einer Nahrungsquelle ausfindig zu machen, sind relativ einfach. Sie beruhen letztlich nur darauf, dass flüchtige Pheromonspuren gelegt und beim Verfolgen dieser Spuren einige sehr einfache Regeln befolgt werden. Die Fähigkeit zur Bewältigung hoher Komplexität (höhere Ebene) beruht also auf recht einfachen Prinzipien (niedrigere Ebene).[119] Diese eher wenig komplexen Mechanismen konnten relativ leicht in entsprechende Optimierungsverfahren (Ameisen-Algorithmen) übertragen werden.

Komplexität der bionischen Vorbilder

Bei der Photosynthese hingegen, die als Vorbild für bionische Verfahren zur Energiegewinnung dient, handelt es sich schon auf der physikalisch-chemischen Basisebene um hochkomplexe Strukturen und Prozesse, welche die Energie aus Photonen aufnehmen, weiterleiten und letztlich über eine Fülle von Zwischenreaktionen in chemische Energie umwandeln und speichern. Die Nachahmung der Photosynthese ist damit ein ungleich schwierigeres Unterfangen. Gegenwärtig sind viele der einzelnen bei der Photosynthese ablaufenden Prozesse noch nicht einmal oder nur ansatzweise verstanden bzw. aufgeklärt, so dass noch nicht ernsthaft an eine Übertragung in technische Prozesse zu denken ist. Ein wirklich bionisch-technisches Verfahren, das die Photosynthese auch nur annähernd nachahmt, gibt es demzufolge auch noch nicht. Als Fazit mit Blick auf Treiber und in diesem Fall besonders Hemmnisse bionischer Innovationen kann festgehalten werden, dass die Komplexität des Vorbilds bzw. noch genauer: die Verteilung von Komplexität im Vorbild, die Übertragbarkeit in technische Prozesse massiv beeinflusst.

Fehlendes Grundlagenwissen über biologische Systeme

Ein weiterer Aspekt, der die Schwierigkeiten einer Übertragung vom natürlichen Vorbild in die technische Anwendung bestimmt, liegt

119 Als Beispiel für diese Form des Umgangs mit Komplexität (nicht zu verwechseln mit der Reduktion von Komplexität) sei hier eine Überlegung von Gößling-Reisemann angeführt: Ein heutiger Forscher und Entwickler, der den Auftrag bekäme, ein zweirädriges Gefährt zu entwickeln, würde vermutlich nie ein Fahrrad entwicklen. Anstatt das Fahrprinzip recht einfach zu lösen und die Steuerung dem darauf sitzenden Menschen zu überlassen, würde er versuchen eine hochkomplexe Selbststeuerung in das Fahrrad selbst einzubauen.

in der Möglichkeit, Teilaspekte aus dem gesamten betrachteten biologischen System zu extrahieren, zu isolieren und auf technische Systeme zu übertragen. Für Otto Lilienthal war bspw. der Durchbruch beim Versuch des Fliegens nach dem Vorbild des Vogelfluges erst dadurch möglich, dass er den Auftrieb vom Vortrieb analytisch trennte (sich dadurch von der Nachahmung des Flügelschlags verabschiedete) und sich ganz auf den Auftrieb (auf das Gleiten) konzentrierte.

Schwierigkeit der Herauslösung von Einzelaspekten im Übertragungsprozess

Bei den Bemühungen um eine künstliche Photosynthese sind derartige Herauslösungen derzeit nicht in Sicht. Noch ist offen, ob sie nur funktioniert (und auch nur als „bionisch" bezeichnet werden sollte), wenn dabei die Energie von solaren Photonen in chemisch gebundene Energie umgewandelt wird – im Idealfall unter Verwendung von Kohlendioxid und Wasser. Die Strukturen, Materialien und Prozesse der Photosynthese scheinen eine funktionelle Einheit zu bilden. Wird diese Einheit zerstört, indem einzelne Aspekte herausgelöst werden, scheint automatisch auch die Gesamtfunktion verloren zu gehen. Photonen scheinen nur mit entsprechenden Antennensystemen eingefangen und in entsprechende Reaktionszentren weitergeleitet werden zu können. Dort wiederum scheinen nur bestimmte Moleküle in der Lage zu sein, Ladungsträger zu produzieren, welche die für die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff nötige Energie bereitstellen, usw. Wenn man also bionische Innovationen auf einer Skala zwischen „Kopie der Natur" auf der einen und „Inspiration durch die Natur" auf der anderen Seite betrachtet, so kann festgehalten werden, dass sich der forschungs- und entwicklungsseitige Prozess der Umsetzung einer bionischen Idee in marktfähige Produkte und Verfahren umso schwieriger gestaltet, je stärker man an die Integrität bzw. funktionelle Einheit des natürlichen Vorbilds gebunden ist.

Von der »Inspiration« durch die Natur zur »Kopie« der Natur

Das Spezifische der bionischen Innovationen, ihre Orientierung am Vorbild Natur, kann also sowohl als Treiber als auch als Hemmnis wirken. Als Treiber wirken dabei in der Regel genau diejenigen Eigenschaften, deretwegen man auf ein natürliches Vorbild überhaupt zurückgreift. Im Fall des Lotuseffekts sind dies die Schmutz abweisenden Eigenschaften einer Oberfläche, im Fall der bionischen Optimierungsverfahren die Fähigkeit, auch in komplexen und verrauschten Umwelten zu funktionieren, im Fall der bionischen Verfahren zur Energiegewinnung die Fähigkeit, Solarstrahlung in nutzbare Energieformen umzuwandeln, etc. Gelingt eine Übertragung der jeweiligen biologischen Eigenschaften in das entsprechende technische System, so liegt gerade in der Qualität der bionischen Lösungen der Vorteil im Innovationswettbewerb gegenüber vergleichbaren, nicht-bionischen Systemen.

Kein »Alles oder Nichts«-Prinzip

Nun funktioniert diese Übertragung allerdings (zum Glück!) nicht nur nach dem „alles oder nichts“ Prinzip. Dennoch geht die Übertragung gewünschter Eigenschaften und Funktionen des biologischen Vorbilds oft mehr oder weniger zwangsläufig auch mit der Übernahme zumindest einiger auch unerwünschter Eigenschaften einher. Ein populäres Beispiel stellt in diesem Zusammenhang wiederum die Innovation Lotuseffekt dar. Die Noppenstruktur, welche letztlich für den gewünschten Effekt verantwortlich ist, bewirkt gleichzeitig einen optischen Effekt, nämlich eine matte Erscheinung der Oberfläche. Noch unabhängig von der Schwierigkeit ihrer technischen Realisierung, allein schon aufgrund der vorherrschenden Orientierung auf „glänzende Karossen“, wird es deshalb vermutlich selbstreinigende Autos auf absehbare Zeit nicht geben.

Beispiel Farbstoff basierte und andere organische Solarzellen

Auch Farbstoff basierte und andere organische Solarzellen zeichnen sich einerseits durch eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen Solarzellen aus, welche sie letztlich ihrem biologischen Vorbild zu verdanken haben. Sie können diffuses Licht nutzen, benötigen keine schwer zu beschaffenen Halbleitermaterialien, sind leicht und formbar, etc. Bio-organische Materialien sind zudem in der Regel gut biologisch abbaubar. Insofern ist es nicht überraschend, dass die Verwendung organischer Farbstoffe und anderer Materialien in organischen Solarzellen mit einer kürzeren Lebensdauer und einem relativ schnellen Abflachen der Leistungskurve über die Zeit einhergeht. Während Pflanzen und Photosynthese betreibende Bakterien die Strukturen, die an der Photosynthese beteiligt sind, stetig erneuern und so eine konstante Leistung über einen sehr langen Zeitraum gewährleisten können, fehlen den organischen Solarzellen solche Möglichkeiten der Selbstreparatur und des Nachwachsens. Die Tatsache, dass die Farbstoff basierten Solarzellen, welche von allen nicht-konventionellen Solarzellen bisher am weitesten in ihrer Entwicklung fortgeschritten sind, bisher maximale Lebensdauern von nur ca. fünf bis zehn Jahren aufweisen, während Silizium basierte Solarzellen zwanzig Jahre und länger bei hoher Leistung funktionieren, hat die Innovation und die Markteinführung bisher in wahrscheinlich großem Maße blockiert.

»Künstliche Photosynthese«

Summe der Innovationseigenschaften entscheidend

Wie alle Innovationen müssen auch bionische Innovationen immer in der Summe ihrer relevanten Eigenschaften und Funktionen anderen, nicht-bionischen Lösungen wesentlich überlegen sein, wenn sie diese verdrängen wollen. Eine nicht isolierbare und deshalb notwendigerweise mit übertragene negative Eigenschaft kann so den Erfolg hoch interessanter Innovationen blockieren.

5.5 Perspektivische Einordnung der Bionik

Aus der Innovationsperspektive heraus ist die Bionik wahrscheinlich keine Schlüsseltechnologie, von der erwartet werden kann, dass sie ganze Branchen oder Volkswirtschaften revolutioniert. Sie ist aber auch kein auf bestimmte Produktlinien und Branchen fokussierter technologischer Ansatz. Die Bionik stellt vielmehr einen sehr heterogenen, generisch querschnittsorientierten Ansatz dar, der im Grundsatz in vielen verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen und F&E-Bereichen anwendbar ist. Am ehesten trifft eine Charakterisierung als „enabling technology" zu.[120] Es handelt sich bei der Bionik nämlich um eine „befähigende Technologielinie" mit einer ganz bestimmten Entstehungsgeschichte und – darauf aufbauend – mit einer ganz bestimmten (Lösungs-)Qualität. Bionik steht dabei meist im Wettbewerb zu herkömmlichen Ansätzen und muss ihre Vorteilhaftigkeit immer wieder aufs Neue am Markt beweisen. Wie schon mehrfach erwähnt, sind bisher etliche vielversprechende bionische Lösungsansätze bereits in frühen Innovationsstadien auf (bislang) unüberwindbare Hemmnisse gestoßen. Insofern spricht wenig für überschwängliche Erwartungen hinsichtlich potenziell erfolgreicher Markteinführungen bionischer Lösungen. Das gilt allerdings in gleicher Weise auch für weite Bereiche der Bio- und Gentechnologie oder der Materialwissenschaften. Angesichts bestehender Systemträgheiten und Pfadabhängigkeiten hat es zunächst einmal jede Innovation schwer – und sie hat es noch schwerer, wenn sie nicht ohne weiteres auf bestehende Innovationssysteme zurückgreifen kann, sondern wenn die Voraussetzungen für erfolgreiche Innovationen erst noch mit geschaffen werden müssen. Damit Innovationen vorankommen, müssen schon gute Gründe und starke Treiber existieren. Innovationen müssen bspw. die Erschließung neuer Märkte ermöglichen oder sehr weit reichende Vorteile gegenüber den bisherigen Lösungen aufweisen, oder sie müssen für den Erhalt der Wettbewerbsposition der betroffenen Unternehmen von grundlegender Bedeutung sein. Inwiefern diese „guten Gründe" und Treiber im Fall vieler bionischer Lösungen gegeben sind, lässt sich nicht zuletzt aufgrund der oben erwähnten starken Heterogenität bionischer Ansätze kaum pauschal beurteilen.

Bionik als »befähigende Technologielinie«

Heterogenität bionischer Ansätze

120 Der Begriff der „enabling technology" ist zugegebenrmaßen durch eine gewisse Unschärfe gekennzeichnet. Angewendet auf die Nanotechnologien wird damit meist auf die Erwartung abgehoben, dass die neuen Fähigkeiten zur Gestaltung auf der Ebene der elementaren Bausteine – wie es oft so schön heißt „atom by atom" – völlig neue technische Möglichkeiten eröffnet. Von solcher Art ist die Bionik aber nicht. Sie erschließt auch neue Möglichkeiten, aber nicht durch *eine Technologie*, sondern durch einen ganz bestimmten Lösungsweg.

Bionische Innovationen in einer Vielzahl von Bereichen zu erwarten

Weil die Bionik keine Technologielinie, sondern eher einen Lösungsweg darstellt, ist sie in der Lage, die unterschiedlichsten Bereiche zu beeinflussen. Dies gilt bspw. gerade auch für die oben angeführten Querschnittstechnologien wie IKT, Materialwissenschaften und Nanotechnologien, in denen sie die wesentlichen Orientierungen geben kann für neue Lösungswege und Gestaltungsoptionen. Beispielsweise schreibt Sörensen (2004) in Bezug auf IT-Anwendungen: „Biomimetics is a design methodology for complex artifacts, deployment to support human design with self organizing evolutionary mechanisms“ und verweist zugleich darauf, dass bspw. das IBM „Autonomic Computing Project“ vor dem Hintergrund gestartet wurde, dass die Entwicklung und Aufrechterhaltung von künftigen IT-Systemen nur durch neue Wege des Designs solcher Systeme möglich sein wird. So werden bspw. vor diesem Hintergrund die Ansätze des „Organic Computing“ in Deutschland gefördert, um die perspektivische Nachfrage in relevanten Anwendungsbereichen befriedigen zu können. Allerdings wird mit einer breiten Marktdurchdringung erst ab dem Jahr 2015 gerechnet (BMBF 2006b). Dies gilt ebenfalls für eine Vielzahl weiterer Bereiche (insb. Materialwissenschaften, Proteomics und Nanobiotechnologien), wie insbesondere auch in den Fallstudien, aber auch den Analysen der Technologieprognosen verdeutlicht werden konnte (vgl. Kapitel 3.1). Ein spätestens seit Mitte der 90er Jahre im Bereich der Literatur und der Patente festzustellender Aufschwung bionischer Ansätze könnte darauf verweisen, dass sowohl Ansätze aus dem engen Bereich der Bionik als auch allgemeinere Ansätze des „Lernens von der Natur“ (Stichworte sind „Selbstorganisation“, „Selbstheilung“ etc.) in einer ähnlichen Zeitperspektive Marktrelevanz erreichen könnten.

› s. Kapitel 3.1

Keine schnellen Lösungen

Das Angebot an neuen bionischen Lösungen für komplexe Probleme (man denke nur an Selbstorganisationsprozesse in logistischen Ketten, Robotik, Materialwissenschaften etc.) scheint auf eine entsprechende Nachfragesituation zu treffen, in der sich gerade die Komplexitätsproblematik zunehmend in den Vordergrund schiebt. Allerdings versprechen auch diese bionischen Forschungsrichtungen nicht zwangsläufig schnelle technische Lösungen. In der Perspektive dürften diese Ansätze allerdings für die unterschiedlichen wissenschaftlichen und technischen Zweige erhebliche Bedeutung erlangen.

Was die zukünftige Rolle der Bionik für die nationale Innovationslandschaft anbelangt, so haben die Analyse der Technologieprognosen, die (Vertiefungs-) Fallstudien sowie die Diskussionen in den durchgeführten Workshops und die Interviews verdeutlicht, dass

wesentliche Aspekte der technologischen Entwicklungsrichtung mit einigen Leitvorstellungen der Bionik eng verbunden sein können. In einer Vielzahl von Bereichen (Robotik, Materialwissenschaften, IKT) spielen bionische oder biomimetische Aspekte eine wichtige Rolle.

Bionik als Ansatz zur Komplexitätsbewältigung

Die Bionik erweist sich als hochgradig anschlussfähig in Bezug auf die Entwicklung neuer Technologien, technologische Entwicklungen und Marktanforderungen in unterschiedlichen Wissenschafts- und Technologie-Bereichen. Die erhöhten Anforderungen an die Adaptivität technischer Systeme und an die Fähigkeiten zur Komplexitätsbewältigung haben dem bionischen Zugang zumindest teilweise den Weg geebnet. Die Suchprozesse in Wissenschaftsbereichen wie Chemie, Materialwissenschaften, Nanotechnologien und Informations- und Kommunikationstechnologien führen zu im weitesten Sinne bionischen Ansätzen (u. a. Multifunktionalität, Selbstheilung etc.). In diesem Sinne dürfte sich die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass bionische Ansätze einen zunehmenden Einfluss auf die Gestaltung technischer Systeme der Zukunft haben werden.

In besonderem Maße wird dies für die „Bottom-up"-Nanotechnologien gelten und deren erwartete Verbindung mit anderen Wissenschaftsbereichen zu den sog. „converging technologies". Es kann davon ausgegangen werden bzw. es ist bereits zu beobachten, dass in den unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen (und deren Konvergenz) weitgehende Paradigmenwechsel anstehen, die, um letztlich erfolgreich umsetzbar zu werden, auch weitgehende Anpassungen des Innovationssystems erforderlich machen und mithin neue technisch-ökonomische Trajektorien sich herausbilden können.

Anpassungprozesse im Innovationssystem erforderlich

Bestätigt sich diese These, dann ist es zugleich erforderlich, dass möglicherweise weitgehende Anpassungsprozesse des Innovationssystems erforderlich sind und dementsprechend neue Pfadgestaltungen sich entwickeln werden. Die Diskussion um die Perspektiven der Nanotechnologien und insbesondere der „converging technologies" verdeutlichen diese Ansätze und führen bereits zu einer Veränderung der Förderlandschaft. Bionik kann in diesem Kontext eine wesentliche Funktion haben.

5.6 Zwischenfazit Bionik und Innovationen

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse hinsichtlich der Bionik spezifischen Treiber und Hemmnisse bionischer Innovationen festgehalten werden:

(Nicht-)Entsprechung zwischen der Komplexität des natürlichen Vorbilds und der bionischen Lösung („complexity-match“ oder „-mismatch“)

Die analytische und technische Isolierbarkeit bestimmter Teilfunktionen (bzw. Teilschritte) im natürlichen Vorbild erleichtert die Übertragbarkeit, so bspw. die Trennbarkeit von Auftrieb und Vortrieb beim Flugzeugflügel oder die Trennbarkeit der zu erzielenden Form vom natürlichen Werkstoff. Die analytische und technische Nicht-Isolierbarkeit von Teilfunktionen, -prozessen oder –strukturen erschwert die Übertragbarkeit und zwingt stärker zu einem komplexen „Nachbau“ (bspw. Komplexität der natürlichen Photosynthese). Hierher gehören auch die noch ungelösten technischen Probleme zum Nachbau hierarchischer Werkstoffe, zur Realisierung einer „echten“ Lotusoberfläche oder zur Realisierung selbstorganisierender und sich selbst heilender (reparierender) technischer Systeme. Hierher gehört schließlich auch der Befund, dass eine dynamischere Nachfrage nach den naturanalogen Optimierungsverfahren möglicherweise erst noch bevorsteht, wenn die technischen und bspw. auch die logistischen Probleme höhere Fähigkeiten zur Komplexitätsbewältigung voraussetzen.

Wenn man also bionische Innovationen auf einer Skala zwischen „Kopie der Natur“ auf der einen und „Inspiration durch die Natur“ auf der anderen Seite betrachtet, so kann festgehalten werden, dass sich der forschungs- und entwicklungsseitige Prozess der Umsetzung einer bionischen Idee in marktfähige Produkte und Verfahren umso schwieriger gestaltet, je näher man an das natürliche Vorbild gebunden ist. Kann man jedoch stark vom natürlichen Vorbild abstrahieren und nur Einzelaspekte losgelöst vom systemischen Kontext übertragen, so wird der Umsetzungsprozess leichter und wahrscheinlich auch schneller.

Kopplung von erwünschten und unerwünschten Funktionen, Strukturen und Eigenschaften („functional trade-offs“).

Wenn wir „biologisch abbaubare“ Werk- und Hilfsstoffe bevorzugen, haben wir automatisch mit der begrenzten Stabilität dieser Stoffe zu kämpfen. Wir müssen nach Lösungen suchen, die Stoffe in bestimmten Umgebungsbedingungen „stabil“ zu halten und in anderen „abbaubar“. Die Natur macht das mit dem Holz, das in der Trockenheit stabil ist und in der Feuchtigkeit abgebaut wird, seit Jahrmillionen vor. Ein weiteres Beispiel sind die Farbstoff basierten Solarzellen, deren Lebensdauer auf Grund der verwendeten organischen Materialien gegenwärtig noch eher begrenzt ist. Zumindest bisher scheinen die vielen mit dem Einsatz organischer Absorber verbundenen Vorteile von Farbstoff-Solarzellen (höhere Flexibilität, Ausnützung diffusen Lichts, geringere Toxizität)

noch untrennbar mit den in der Natur allgegenwärtigen Alterungsprozessen verknüpft zu sein. Ein weiteres Beispiel für derartige „trade-offs“ wäre der (echte) Lotuseffekt, der (im Unterschied zu bloß hydrophoben Oberflächen) nicht als glänzende Oberfläche zu realisieren ist.

Bionik als Orientierung und implizites Leitbild zukünftiger Technologien

Generell ist zudem festzuhalten, dass das biologische Vorbild zunehmend eine Orientierungsfunktion auch für technologische Entwicklungen hat. Dies führt einerseits dazu, dass biologische Systeme zunehmend interdisziplinär analysiert werden, um technologische Lösungsansätze zu identifizieren. Insbesondere die IKT Technologien ermöglichen neue Zugänge der Analyse und Modellierung. Im Falle der Nanotechnologien wird zunehmend auf bionische bzw. biomimetische Ansätze verwiesen, wobei eine der grundsätzlichen Orientierungen der Nanotechnologien, nämlich der „Bottom-up“-Ansatz im Grundsatz auf die natürlichen „Produktionsprozesse“ verweist.

Die wesentlichen Treiber, die auch und vor allem für die Bionik im weiten Sinne („Lernen von der Natur“) bzw. für den dritten Strang einer Nanobionik einen Schub bedeuten könnten, dürften im Wesentlichen denjenigen ähneln, die auch die Entwicklungsdynamik der Nanotechnologien bestimmen. Die grundsätzliche Idee des „Bottom-up“-Ansatzes, die Option der Selbstorganisation bzw. des „Wachsen lassens“, eröffnen für Nanotechnologien und Bionik gleichermaßen interessante Perspektiven. Der erwartbare Schub, die erwartbare Dynamik ist allerdings derzeit noch eher technologiegetrieben. Die Nachfrageseite dürfte allerdings dort immer stärker ins Spiel kommen, wo sich in einer Reihe von Anwendungsfeldern die „Grenzen“ herkömmlicher technologischer Ansätze zunehmend als Hemmschuh herausstellen und insofern die Suche nach neuen technologischen Optionen intensiviert wird.

Bionik als Erweiterung des Suchraumes

In Bereichen, in denen offenbare Hemmnisse bestehen, Lösungen auf der Basis bestehender Ansätze bzw. Technologien zu generieren, scheint der bionische Ansatz als Orientierung einen wichtigen Stellenwert zu haben, in dem der Problemlösungshorizont erweitert wird (Analogiebildung).

Biologische Systeme weisen tlw. Eigenschaften und Fähigkeiten auf, die von gegenwärtigen technischen Systemen nicht erreicht werden. Besteht oder entwickelt sich nun aber ein Bedarf nach höchstleistungsfähigen technischen Systemen, deren Eigenschaften und Fähigkeiten

jenen analoger biologischer Systeme ähneln, gleichen oder diese sogar übertreffen sollen, können Innovationen aus der Bionik zur Deckung dieses Bedarfs herangezogen werden.

Bionik –positives Image neuer Technologien

Die Bionik verfügt über ein hochgradig positives Image in der Öffentlichkeit. Insbesondere die in den vergangenen Jahren zahlreich erschienenen Bildbände (Blüchel/Malik 2006; Nachtigall/Blüchel 2003; SiemensForum 1999; WWF 1991) und (populär)-wissenschaftlichen Sachbücher (Blüchel 2006; Cerman et al. 2005; Kesel 2005; Willis 1997; Marguerre 1991) und auch eine Reihe von Fernseh- und Radiosendungen über Bionik machen deutlich, welch positives Image die Bionik transportiert. Aufgrund der Faszination, welche von den beachtlichen Leistungen natürlicher Organismen und deren Strukturen und Prozesse ausgeht, wird Bionik einerseits als eine moderne High-Tech-„Angelegenheit" wahrgenommen. Andererseits verbinden sich mit der Bionik keine negativen Assoziationen, da ja die Natur, die meist als etwas Positives gesehen wird, der Bionik als Vorbild dient.

Es sind also, insgesamt betrachtet, verschiedene Ebenen zu unterscheiden:

Verschiedene Ebenen des Innovationserfolgs

Innovationserfolg in Abhängigkeit vom bionischen Abstraktionsgrad

Bedeutung des Wissens über die exakte Funktionsweise des natürlichen Vorbildes

Einerseits ist festzustellen, dass die Innovationsfähigkeit bzw. der Innovationserfolg bionischer Ansätze mitunter davon abzuhängen scheint, an welcher Stelle des oben beschriebenen Kontinuums des Lernens von der Natur die konkrete Entwicklung ansetzt. So zeichnen sich bspw. die meisten der erfolgreichen Innovationen aus der Bionik, wie die Winglets an Flügelenden von Flugzeugen oder in (ihrer jetzigen Gestalt) die Lotuseffekt-Oberflächen, gerade dadurch aus, dass die exakte Funktionsweise des natürlichen Vorbildes nicht genau bekannt bzw. exakte kausale Zusammenhänge nicht verstanden sein mussten, um dennoch eine Nachahmung zu bewerkstelligen. Ein recht hoher Abstraktionsgrad war möglich und die Herauslösung von Teilaspekten, wie bspw. das Übertragen der Form, nicht aber des Materials, führte nicht zu einem Versagen des gewünschten Effekts.

Anders liegen die Dinge freilich bei der künstlichen Photosynthese. Hier lassen bionische Anwendungen noch lange auf sich warten, da eine Nachahmung des natürlichen Prozesses, nämlich die Konversion von Photonenenergie in chemisch gebundene Energie, nur mit ähnlich komplexen Strukturen auf molekularer Ebene gelingen kann. Zudem setzt die Nachahmung des Prinzips der Photosynthese ein gewisses Verständnis der chemischen und physikalischen Abläufe in der Pflanze

bzw. dem Bakterium voraus, deren Generierung jedoch noch einige Jahre (einige Experten rechnen gar mit Jahrzehnten) der Grundlagenforschung bedarf.

Innovationserfolg in Abhängigkeit von konkurrierenden Trajektorien

Pfadabhängigkeiten

Andererseits ist bei einzelnen bionischen Entwicklungen zu überprüfen, wie sich die Wettbewerbsposition der bionischen Lösungen, so sie denn das Stadium der Marktreife erreichen, darstellt. Bei der Umsetzung der technologischen Entwicklungstrends werden allerdings bionische Lösungen keineswegs vorrangig berücksichtigt. Vielmehr werden i. d. R. bestehende technologische Ansätze weiterentwickelt, also bestehende Trajektorien werden gefestigt (siehe das Beispiel der Optimierungsverfahren oben). Veränderte technologische Zugänge setzen sich nur dann durch, wenn die bestehenden technologischen Linien an nicht überwindbare Hemmnisse stoßen bzw. es gelingt, die Funktionsfähigkeit der alternativen (bionischen) Lösungen so zu steigern, dass der Einsatz wirtschaftlich wird. Dies erweist sich allerdings insbesondere dann als ein Problem, wenn im Grundsatz veränderte technologische Zugänge erforderlich sind. Beispielsweise sind natürliche Sensoren gegenwärtig den künstlichen Sensoren bei weitem überlegen. Gleichwohl sind es nicht zuletzt Kostengründe, die die Entwicklung und vor allem den Einsatz von bionischen Sensoren erschweren.

Technologiewettlauf

Des Weiteren kommt es auch zu einem gewissen Technologiewettlauf, in dem traditionelle Ansätze kontinuierlich verbessert werden und so schließlich die Funktionen und Qualitäten erreichen, die bionische Lösungen im Grundsatz bieten können, ohne dass aber (explizit) auf Bionik zurückgegriffen werden musste. Teilweise ist zudem festzustellen, dass sich hybride (Technologie-)Entwicklungen herausbilden, die die herkömmlichen Technologien weiterentwickeln und einige Ideen der Bionik damit umsetzen („smart“).

Bionik als Wissenschaftsfeld

Schließlich hängt die Entwicklung von Technologien bzw. insbesondere deren Marktdurchsetzung in der Regel nicht (gezwungenermaßen) von den jeweils eingesetzten Prozessen oder Verfahren ab, sondern von den jeweiligen Funktionalitäten. In welcher Form diese Funktionalitäten erbracht werden, interessiert die meisten Nutzer wenig. Der Hinweis auf einen bionischen Lösungsansatz wird marktseitig in der Regel nicht honoriert.

Neben den genannten Treibern und Hemmnissen, welche sich entlang des Innovationsprozesses identifizieren lassen, gibt es auch eine Reihe von Faktoren, welche auf die Bionik als Wissenschaftsfeld insgesamt wirken.

Bionik ist (noch) immer geprägt und getragen von einer kleinen Community und Einzelpersonen

Die explizite Bionik-Community („Bionik im engen Sinne") ist eher klein (vgl. Kapitel 4). Gleichwohl gelingt es ihr in gewissem Maße, öffentlichkeitswirksam präsent zu sein. Allerdings ist damit auch verbunden, dass die Wirkung in die wissenschaftlichen und unternehmerischen Communities zwangsläufig begrenzt ist. Zur Stärkung und Entwicklung des bionischen Ansatzes ist es von daher erforderlich, dass die Basis der Community (weiter-)entwickelt wird, wie es durch entsprechende Förderansätze gegenwärtig bereits geschieht. Die Nanotechnologieförderung hat deutlich gemacht, wie ein Feld unter einem „umbrella" entwickelt werden kann.

› s. Kapitel 4

Bionik als Feld verfügt nur über eine begrenzte Institutionalisierung

Bionik wird bis heute weder von Seiten der Biologie noch von Seiten der Ingenieurwissenschaften in nennenswerter Form institutionalisiert betrieben, Bionik Treibende werden nicht durch ein etwaiges Bildungs-, Forschungs- und Entwicklungssystem hervorgebracht. Auch die wenigen universitären und außeruniversitären Institutionen wie Studiengänge, Vorlesungen oder Forschungs- und Entwicklungsabteilungen, Gesellschaften und Kongresse (für eine Übersicht siehe Nachtigall 2002, 19ff/35ff und Kapitel 4.7 dieser Studie) konnten daran bisher wenig ändern. Daher können die meisten der bisherigen Innovationsanstrengungen aus der Bionik auf ein starkes Engagement einzelner Personen und Personengruppen zurückgeführt werden. Dies gilt zwar auch für andere Arten von Innovationen, scheint aber bei der Bionik ganz besonders der Fall zu sein.

› s. Kapitel 4.7

Die Netzwerkbildung befindet sich damit erst in den Anfängen, ist aber zentral für die Durchsetzungsfähigkeit des bionischen Ansatzes. Dies ergibt sich zum einen aus den Erkenntnissen zu Innovationsnetzwerken und -systemen im Allgemeinen und zum anderen aus den spezifischen Eigenschaften der Forschung und Entwicklung der Bionik (aber auch der „general purpose technologies" im Allgemeinen: breite Einsetzbarkeit, begrenzte Verfügbarkeit zentralen Wissens über potenzielle Einsatzfelder). Deren Basis bildet nämlich gerade die Übertragung – d. h. der Transfer – von biologischen Erkenntnissen in genuin nicht-biologische Kontexte. Damit erlangt der Technologie- und Wissenstransfer, der auch in anderen Zusammenhängen als wichtige Determinante von Innovationsprozessen identifiziert worden ist (vgl. Walter 2005), bezüglich der Bionik eine besonders herausragende Stellung (bereits Zerbst 1987, 22ff). Diese Hypothese ist in Interviews auch mehrfach bestätigt worden.

Bionik und Unternehmen

Unternehmen sind gegenwärtig nur begrenzt in der Lage Innovationsprojekte aus der Bionik zu verfolgen. Aus den durchgeführten Analysen wurde deutlich, dass Offenheit gegenüber bionischen Ansätzen stark von wenigen Einzelpersönlichkeiten in den Unternehmen abhängt. Die Bionik scheint insgesamt noch stark auf den Bereich universitärer und anderer öffentlicher Forschung und Entwicklung beschränkt zu sein (vgl. auch Kapitel 4). Wenn keine Partner im Unternehmensbereich gefunden werden können, übernehmen häufig Bioniker/innen die Übertragung der bionischen Ansätze in Produkte und Verfahren selbst (Ausgründungen). Diese Erkenntnis ergibt sich aus einer Analyse der in der Bionik-Literatur dargestellten Innovationen aus der Bionik (bspw. Nachtigall 2002) und wurde auch in Interviews bestätigt. Der Lotuseffekt steht exakt für dieses Phänomen, dass Biologen letztlich selbst Unternehmer werden mussten.

› s. Kapitel 4

Disziplinäre Zugänge erschweren die Durchsetzung bionischer Ansätze

Bionik erfordert in besonderer Weise interdisziplinäres Arbeiten. Biologische Erkenntnisse müssen vor dem Hintergrund gegenwärtiger und möglicher zukünftiger technischer Bedarfe generiert und dann in technische Anwendungen transferiert werden. Dieser Prozess erfordert ein sehr hohes Maß an interdisziplinären Fähigkeiten seitens der involvierten Akteure, welche in den vorrangig interdisziplinären Projekten und Netzwerken bionischer Forschung und Entwicklung zum Tragen kommen müssen (vgl. Specht 2005, 252ff).

Nach wie vor sind Bildung, Forschung und Entwicklung jedoch noch sehr stark disziplinär ausgerichtet; Interdisziplinarität findet sich lediglich bei benachbarten oder relativ stark verwandten Disziplinen im Ansatz verwirklicht. Die Bionik stellt jedoch eine Verbindung von Wissenschaftsbereichen dar, die bisher sehr weit voneinander getrennt waren und es bis heute noch sind. Daher erfüllen momentan nur sehr wenige Personen die Anforderungen biologisch-ingenieurwissenschaftlicher Interdisziplinarität. Die Methoden, Fachtermini und auch Wissenschaftsbilder beider Disziplinen unterscheiden sich sehr stark voneinander, was ein Aufeinander-Zugehen und eine Kommunikation beider erheblich erschwert.

Dort, wo Fähigkeiten interdisziplinären Forschens und Entwickelns vorhanden sind, mangelte es darüber hinaus bisher auch an Möglichkeiten, diese Fähigkeiten auch zur Anwendung zu bringen (Interviewaussagen). Denn auch die (öffentliche) Forschungsförderung war sehr stark disziplinär orientiert, so dass es kaum Wege zur Akquirierung

von Forschungsmitteln für Bionik-Projekte gab. Die in jüngerer Zeit eingesetzte Bionik-Förderung hat hier wichtige positive Veränderungen gebracht.

Faszination Bionik auf der Ebene der Idee – Skepsis hinsichtlich der Umsetzung

Bionik ist noch weit vom wissenschaftlichen und industriellen Mainstream entfernt. Als eine Verbindung von Biologie, harten Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften wird Bionik in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung und auch bei Unternehmen als ein „Exot" wahrgenommen, der zwar hier und dort interessante Innovationen angestoßen haben mag, darüber hinaus jedoch noch nicht als vielversprechende Möglichkeit zur systematischen und breit gestreuten Generierung erfolgreicher Innovationen taugt. Das, was in der breiten Öffentlichkeit Faszination und Begeisterung auslöst, ruft in der Forschung und Entwicklung und bei Unternehmen oft Skepsis hervor („Kann das wirklich funktionieren?"). Die Grenzen zwischen (biologischen) Fachdisziplinen und der Bionik (bzw. bionischen Ansätzen) sind nach wie vor hoch: auch die exponierten Vertreter der Bionik verorten sich selbst in ihrer Fachdisziplin. Ein Grund für die mangelnde Akzeptanz bionischer Ansätze bei etablierten Wissenschaftlern und Entwicklern mag auch in der Tatsache zu finden sein, dass es nach wie vor noch keine belastbare Methodik bionischen Arbeitens gibt, welche als nachvollziehbarer Beleg für die systematische Realisierbarkeit eines Lernens von der Natur gelten könnte.

Passförmigkeit bionischer Lösungen vielfach nur begrenzt gegeben

In der Bionik geben herausragende Leistungen biologischer Systeme den Anstoß und bilden das Vorbild für technologische Innovationen. Da jedoch in den meisten Fällen eine komplette Kopie des biologischen Systems weder möglich noch erwünscht ist, werden in der Regel nur wenige Eigenschaften, Strukturen und Funktionen oder Prinzipien des biologischen Vorbilds in das technische System übernommen. Andere Komponenten des technischen Systems hingegen beruhen nicht auf bionischen Entwicklungen und können daher auch weniger vorteilhafte Merkmale aufweisen. Um sich jedoch am Markt durchsetzen zu können, müssen Innovationen – und das gilt nicht nur für die aus der Bionik – in der Summe ihrer Eigenschaften bestehenden Produkten und Verfahren überlegen sein, um eine genügende Nachfrage zu erfahren. Insofern scheitern Innovationen aus der Bionik immer dann, wenn sie zwar hinsichtlich eines oder weniger Merkmale positiv hervorstechen, bezüglich anderer Merkmale jedoch nur durchschnittliche oder sogar unterdurchschnittliche Werte erreichen.

Material-Struktur-Funktions-Einheiten biologischer Systeme

Darüber hinaus bilden biologische Systeme in vielerlei Hinsicht Material-Struktur-Funktions-Einheiten aus, die so stark miteinander verkoppelt sind, dass sich bspw. eine bestimmte Funktion bei gleicher Qualität nur in Verbindung mit den entsprechenden Materialien und Strukturen erreichen lässt. Für die Bionik und bionische Innovationen bedeutet dies, dass bestimmte Höchstleistungen technischer Systeme nach dem Vorbild der Natur häufig einhergehen mit Kompromissen bezüglich anderer Aspekte, was in der Folge eine Innovation unattraktiv machen kann. Ein Beispiel hierfür bildet die Tatsache, dass biologische Materialien technischen Materialien zwar in vielerlei Hinsicht überlegen sind (Multifunktionalität, Gewicht-Volumen-Leistungs-Verhältnis, Umweltverträglichkeit, etc.), im Gegensatz zu technischen Materialien jedoch sehr schnell altern. Bei biologischen Systemen wird dies durch ein permanentes Nachwachsen ausgeglichen, was jedoch bei technischen Systemen gegenwärtig und wohl auch in längerfristiger Perspektive nicht möglich ist.

6 ZUSAMMENFASSUNG

6.1 Bioniktrends
6.2 Technologische Potenziale des »Lernens von der Natur«
6.3 Themen, Akteure und Netzwerke – Ergebnisse der Literatur- und Patentanalysen
6.4 Bionik und Innovationen

»Technik als Entbindung und Vermittlung der im Schoß der Natur schlummernden Schöpfungen, das gehört zum Konkretesten an konkreter Utopie.«

ERNST BLOCH, 1885 – 1977

6 ZUSAMMENFASSUNG

6.1 Bioniktrends

Drei Hauptstränge der Bionik

Stark vereinfachend lassen sich drei zeitlich und vom Ansatz her unterscheidbare Hauptstränge der Bionik ausmachen, wobei der dritte Strang maßgeblich zur Überwindung von Restriktionen der beiden vorhergehenden beizutragen vermag. Bei diesen drei Strängen handelt es sich um 1) *die Funktionsmorphologie* – Form und Funktion, 2) *die Biokybernetik* – Informationsverarbeitung, Sensorik und Robotik, sowie 3) *die Nanobionik* – Molekulare Selbstorganisation und Nanotechnologie.

Funktionsmorphologie

Erster und ältester Hauptentwicklungsstrang: Funktionsmorphologie – Form und Funktion

Der erste und älteste Entwicklungsstrang fokussiert auf den Zusammenhang zwischen biologischen Formen bzw. Strukturen und deren Funktion. Zu den bisher größten Innovationserfolgen dieser Linie gehören der Fallschirm, der Auftrieb erzeugende Flugzeugflügel, die Stromlinienform sowie der Klettverschluss. Solange sich die wissenschaftlichen Naturbeobachtungen im makroskopischen Bereich bewegten, konnten technische Umsetzungen in eben dieser Dimension mit den jeweils verfügbaren Techniken und Materialien insbesondere dann recht gut gelingen, wenn die interessante Funktion v. a. an die Form und weniger an das Form gebende Material gebunden war. Für die Auftriebsfunktion eines Flugzeugflügels ist vor allem seine Form entscheidend, seine technische Realisierung in einem nicht-biologischen Material ändert daran wenig. Interessant ist zudem, dass viele Erfolgsbeispiele in diesem Form-Funktions-Strang aus dem Bereich der Fluiddynamik stammen. Dies führt zu einer zweiten Erfolgsvoraussetzung. Ein Teil der Errungenschaften der Bionik im Bereich der Fluiddynamik ist der Tatsache geschuldet, dass der bionische Ansatz Restriktionen der mathematisch-experimentellen Physik zu kompensieren in der Lage war. Weder die analytischen noch die neueren numerischen Modelle der Strömungsmechanik waren bisher in der Lage, das Verhalten von Strömungen exakt genug zu berechnen bzw. vorherzusagen, um sozusagen am „grünen Tisch“ Optimierungen vornehmen zu können. Letztlich musste bisher immer noch ein empirisch-experimenteller (ausprobierender) Optimierungsprozess im Strömungskanal durchgeführt werden – und bei einem solchen Ausprobieren hat die Evolution tatsächlich einen riesigen Vorsprung.

Fertigungstechnische Umsetzungsprobleme

Je mehr sich allerdings die Forschungen zum Zusammenhang von Struktur und Funktion vom makroskopischen in den mikroskopischen, bis hinein in den Nanobereich verlagerten, desto größer wurden die fertigungstechnischen Umsetzungsprobleme. Sie gehören heute zu den wichtigsten Restriktionen für weit reichende Innovationen in diesem Feld. Hochinteressante Entdeckungen, bspw. aus den Bereichen der Oberflächenstrukturierung und der funktionalisierten Grenzflächen in biologischen Systemen (wie u. a. Haihaut/Ribletfolie, Lotuseffekt und Antifouling) können bisher nicht fertigungstechnisch umgesetzt werden, so dass die Qualität des technischen Produkts mit der des natürlichen Vorbilds vergleichbar wäre. Bei diesen Beispielen ist aber die technische Umsetzungsqualität für die erwünschte Funktionalität und damit auch für den Innovationserfolg definitiv entscheidend.

Änderung des Produktionsparadigmas

Für die Fertigung mikro- bzw. nanostrukturierter Oberflächen und erst Recht für die Herstellung hierarchisch strukturierter biologischer Materialien nach dem Vorbild der Natur, wie z. B. Knochen, Zähne, Perlmutt oder Spinnenseide, wird eine grundlegende Veränderung unseres Produktionsparadigmas unvermeidbar sein. Wurde im ersten Fertigungsparadigma aus einem vorgegebenen Material (bspw. Stein oder Holz) eine Form herausgeschnitten, so wurde im darauf folgenden Paradigma zunächst der Werkstoff (bspw. Metalle oder Beton) homogenisiert und dann in eine Form gegossen bzw. in From gepresst. Hierarchisch strukturierte Materialien sind aber auf diese Weise nicht zu realisieren, hierfür ist ein drittes Fertigungsparadigma nötig, das „Wachsen lassen“. Für die Herstellung von hierarchisch strukturierten Materialien dürften nur Selbstorganisationsprozesse weiterhelfen, das bionische Lernen kann sich nicht mehr nur an der Form, sondern muss sich auch am biologischen Prozess ihrer Entstehung orientieren, also an biologischen Entwicklungs- bzw. Wachstumsprozessen. Entsprechende technologische Perspektiven können sich im dritten Strang der Bionik mit den „Bottom-up“-Nanotechnologien eröffnen.

Signal- und Informationsverarbeitung, Biokybernetik, Sensorik und Robotik

Der zweite Hauptentwicklungsstrang: Signal- und Informationsverarbeitung, Biokybernetik, Sensorik und Robotik

Während sich der erste Strang um den Zusammenhang zwischen Form und Funktion dreht, ist für den zweiten Strang der kybernetische Regelkreis charakteristisch. Ähnlich wie in der Technischen Biologie standen zunächst aus der Technik entlehnte Modelle zur Erklärung „biologischer“ Phänomene Pate. Die grundlegenden Ansätze und Modelle der Biokybernetik, Sinnes- und Neurophysiologie sowie der Ökosystemtheorie wurden zunächst in biologiefernen technischen Bereichen wie der Elektrotechnik entwickelt (Schwingkreise, Rückkopp-

lungseffekte und Regelkreise sowie Sensoren und Aktoren). Erst mit ihrer Hilfe konnten dann wichtige Fortschritte in der Biologie, v. a. in der Biokybernetik, der Sinnesphysiologie und Neurophysiologie, bis hin zur Hirnforschung erzielt werden, welche dann wiederum positiv auf die (nicht nur bionische) technische Entwicklung in der Sensorik, der Informationsverarbeitung und Robotik zurückwirkten. Letztlich war und ist vor allem in weiten Teilen der Sensorik, der Robotik und der Informationsverarbeitung bis hin zur Künstlichen Intelligenz (KI) der Mensch das bisher unerreichte Vorbild.

Bionik und das Erbe der Künstlichen Intelligenz

In den vergangenen Jahren ist es allerdings, nach der anfänglichen Euphorie, um die Künstliche Intelligenz bedeutend ruhiger geworden. Wenn man aber aus guten Gründen aktuelle Ansätze wie dezentrale Steuerung, Neuronale Netze bzw. allgemeiner „organic computing" zu den bionischen Lösungen mit natürlichem Vorbild zählt, so scheint sich in diesem zweiten bionischen Strang derzeit wieder eine Aufbruchstimmung auszubreiten, weil insbesondere mithilfe der erwähnten bionischen Ansätze zur Komplexitätsbewältigung einige der inzwischen angesammelten Restriktionen im Bereich der Signal- und Informationsverarbeitung und der Robotik überwunden werden können. Dieser zweite, eher biokybernetische Strang der Bionik scheint also das Erbe der KI anzutreten und zudem über die Verschmelzung von Robotik, Sensorik und Prothetik Fahrt aufnehmen.

Nanobionik – Molekulare Selbstorganisation und Nanotechnologie

Der dritte und jüngste Hauptentwicklungsstrang: Nanobionik – Molekulare Selbstorganisation und Nanotechnologien

Der dritte und jüngste Entwicklungsstrang der Bionik ist auf der molekularen und Nanoebene angesiedelt. Auch dieser Strang kann bereits auf eine längere Vorgeschichte zurückblicken. Nicht zuletzt getragen vom Schub in der Nanotechnologie insgesamt, scheint ihm aber erst derzeit der Durchbruch zu gelingen (vgl. bspw. Spinnenseide, Biomineralisation, funktionalisierte Oberflächen, Templat gesteuerte Kristallisation, Neurobionik, Nanobionik usw.). Der nanobionische Strang fokussiert auf Prozesse der molekularen Selbstorganisation sowie die (ontogenetische) Entwicklung von Molekülen, Zellen und Geweben einschließlich deren Umgestaltung (Reaktion auf Beanspruchung) und (Selbst-)Heilung. Mit dieser dritten, derzeit äußerst dynamischen Linie eröffnen sich vielversprechende Lösungsansätze nicht zuletzt auch für die (fertigungs-)technischen Restriktionen des ersten Strangs. Sie eröffnen insbesondere Ansätze für die Herstellung hierarchisch strukturierter, anisotroper Werkstoffe nach dem Vorbild von Knochen, Zähnen oder Pflanzenhalmen. In der weiteren Entwicklungsperspektive liegen intelligente („smarte") Materialien, die auf unterschiedliche Belastungen reagieren und sich ggf. auch selbst heilen können. Von

diesem eher entwicklungsbiologischen Strang der Bionik (Lernen von den ontogenetischen Entwicklungsprozessen) dürfte derzeit und wird in absehbarer Zeit von allen drei Entwicklungssträngen der Bionik die stärkste Dynamik ausgehen, sowohl mit Blick auf die innerwissenschaftliche Dynamik als auch mit Blick auf technische Umsetzungsmöglichkeiten.

Konvergenz der Entwicklungsstränge

Gegenwärtige Tendenz: Konvergenz der drei Hauptentwicklungsstränge

Schließlich kann die Tendenz zur Konvergenz der drei wichtigsten bionischen Entwicklungsstränge beobachtet werden. Diese Konvergenz hat ihr Pendant in einer breiteren Bewegung zur Konvergenz gerade derjenigen Hochtechnologien, in denen ein „Lernen von der Natur“ zu den fortgeschrittensten Forschungs- und Entwicklungsansätzen gehört. Es sind dies die Informations- und Kommunikationstechnologien, die Nanotechnologien, die Biotechnologien, die Materialwissenschaften, die Robotik und die Kognitionswissenschaften. Prominent wird dieses Thema derzeit unter dem Schlagwort der „converging technologies“ diskutiert. Es spricht einiges dafür, dass bionischen Ansätzen im Rahmen dieses Verschmelzungsprozesses eine wesentliche Rolle zukommen wird. In all den genannten Bereichen haben schließlich Begriffe wie Selbstorganisation, Adaptivität, Selbstheilung und Selbstoptimierung einen sehr hohen Stellenwert.

6.2 Technologische Potenziale des »Lernens von der Natur«

Hoher Stellenwert von Ansätzen des »Lernens von der Natur« in Technologieprognosen

Eine Untersuchung des Stellenwerts bionischer Ansätze in ausgewählten Foresight-Studien bestätigte und differenzierte die Aussagen zu den Bioniktrends. Zwar ist in diesen Studien kaum von Bionik selbst die Rede, aber umso mehr von der Orientierung am Vorbild der Natur bzw. vom „Lernen von der Natur“. Natürliche Vorbilder spielen insbesondere in folgenden Feldern eine wichtige Rolle: 1) *Materialwissenschaften und Nanotechnologien* (Biomaterialien, komplexe Polymere, intelligente (smarte), adaptive und selbstheilende Materialien, self assembly), 2) *Medizintechnik* (Prothetik, biokompatible Materialien, Gewebezüchtung, Diagnostik), 3) *Robotik und Lokomotion* sowie 4) *Sensorik und Informationsverarbeitung* (Nano- und Biosensoren, Bioelektronik, Biocomputer, Netzwerkarchitektur, fehlertolerante und selbstreparierende Systeme, neuronale Netze, organic and autonomic computing, evolutionäre Algorithmen, künstliche Intelligenz). In zwei Studien wird zudem explizit auf die Technologiekonvergenzen

hingewiesen.[121] Bemerkenswert ist zudem der mehrfache Hinweis auf das Problem der „Bewältigung von Komplexität". Sie wird als Aufgabe mit zunehmender Bedeutung herausgearbeitet, verbunden mit der Hoffnung, dass bionische bzw. biomimetische Ansätze hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten können.

Ergebnis der Fallstudien: weite Verbreitung bionischer Ansätze

Aufbauend auf den Ergebnissen der Analysen der Technologieprognosen wurden Kurzfallstudien zu den folgenden Wissenschaftsbereichen durchgeführt: Materialwissenschaften, IT, Robotik, Sensorik, Prothetik und Gewebezüchtung, NanoBio, Konvergenztechnologien. Ähnlich wie in den Foresight-Studien wird nicht in allen untersuchten Bereichen explizit auf die Begriffe Bionik bzw. Biomimetik Bezug genommen. Jedoch ergibt sich aus allen Fallstudien ein Bezug auf das Potenzial, von der Natur und ihren Prinzipien zu lernen. Letzteres bezieht sich meist auf Herausforderungen im Umgang mit adaptiven, selbstorganisierenden, smarten bzw. allgemein intelligenten Anwendungen.[122] Zu den im Sinne der Bionik bzw. Biomimetik interpretierbaren Begriffen in der allgemeinen Sensorik-Fachliteratur gehören Bezeichnungen wie intelligent, smart, lernend, selbstkalibrierend, -überwachend, -optimierend, -testend und autark. Auch die Anforderungen an die Geruchs- und Geschmackssensorik, an Sonare, Elektroortung, Dehnungssensoren oder Infrarotdetektoren orientieren sich eindeutig am menschlichen oder tierischen Vorbild. Eng damit zusammen hängen die Ziele der Robotik, wenn es darum geht, Systeme zu schaffen, die mehrere für lebende Organismen charakteristische Funktionen erfüllen können, insbesondere die eigenständige (Fort-)Bewegung im Raum, die Wahrnehmung der Umwelt und die Reaktion auf Umweltreize sowie (situationsabhängiges) zielorientiertes Ausführen bestimmter Tätigkeiten. Im Bereich der Hard- und Software der Informations- und Kommunikationstechnologien geht es bei der Orientierung an natürlichen Vorbildern im Wesentlichen um Robustheit und Adaptivität („self-repair") sowie um einen angemessenen Umgang mit Komplexität (evolutionäre Algorithmen, neuronale Netze, organic und autonomous computing). Ziel sind IT-Systeme mit „Self-X"-Eigenschaften: selbstkonfigurierend, selbstoptimierend, selbstheilend und selbstschützend.

»Lernen von der Natur« und »Self-X«-Eigenschaften vorherrschend– eher seltene Verwendung der Begriffe »Bionik«/»Biomimetik«

121 Key Technologies Expert Group (2005): Creative System Disruption. Towards a Research Strategy Beyond Lisbon. Draft Final Report; Priami, Corrado (2005): Complexity and Systemics. Expert Report for the Expert Group "Key Technologies for Europe". — In einigen analysierten Teilbereichen, wie IT (Microsoft) und Nanotechnologien (Roco) oder auch den Entwicklungsorientierungen der Raumfahrt (NASA) wird in langfristiger Perspektive der Bionik bzw. der Biomimetik eine zentrale Rolle zugeschrieben.

122 Dazu gehört auch z.B. die hierarchische Strukturierung organischer Materialien bzw. Werkstoffe.

Insbesondere Materialwissenschaften haben zunehmende Affinität zu bionischen Ansätzen

Neben Sensorik, Robotik, Informations- und Kommunikationstechnik weisen insbesondere die Entwicklungen in den Materialwissenschaften eine zunehmende Affinität zu biologischen Vorbildern auf. Die bionische Idee, von der Natur zu lernen, hat parallel zur, aber auch als Teil der Nanotechnologie und der „Computational Material Science" in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts Einzug in die Materialwissenschaften gehalten. Letztlich war es die Faszination, die von den bisher unerreichten Leistungen und Eigenschaftskombinationen biologischer Materialien ausging (anisotrop, hierarchisch strukturiert, intelligent, smart, adaptiv, selbstheilend), welche die Orientierung an natürlichen Vorbildern bestimmte. Besonders wichtig war dabei die über die Entwicklungen in der „Bottom-up"-Nanotechnologie aufkeimende Chance, mit dieser skalenübergreifenden Komplexität ingenieurtechnisch umgehen zu lernen und biomimetische Werkstoffe wirklich herstellen zu können. Eine wesentliche Gemeinsamkeit der Materialwissenschaften, der Nanotechnologien und der Bionik liegt in den ihnen innewohnenden Tendenzen zur Verschmelzung (bzw. Konvergenz) bisher getrennt verlaufender Technologielinien („converging technologies"). Vieles spricht dafür, dass diese Tendenz zur Verschmelzung nicht vor allem in der Eigenlogik der jeweiligen technischen Entwicklungslinien (Trajektorien) ihren Grund hat („technology push"), sondern eine Reaktion darstellt auf die immer komplexer werdenden Anforderungen aus der gesellschaftlichen Umsetzung ihrer Möglichkeiten (technology pull). So gesehen kann man die Materialwissenschaften, die Nanotechnologien und die Bionik mit ihrer Orientierung auf Komplexitätsbewältigung als besonders „moderne" Technologielinien bezeichnen. Die Bionik spielt mit Blick auf die Konvergenztechnologien eine doppelte Rolle: Sie ist wesentliches Element zahlreicher Lösungsansätze, und sie ist ebenso wie die Materialwissenschaften und die Nanotechnologien ein Vorbild und Übungsfeld für derartige Konvergenzen.

»converging technologies«

Schwierigkeiten der Abgrenzung von »Bionik« zu »Nicht-Bionik«

Die Konvergenz ist logischerweise mit zunehmenden Schwierigkeiten einer Abgrenzung verbunden. Es wird immer schwieriger zu unterscheiden, ob wir es mit wirklich bionischen oder „nur" biotechnologischen Forschungsansätzen zu tun haben. Am Beispiel der Spinnenseide kann dies verdeutlicht werden. Die Faszination, die von den Eigenschaften der Spinnenseide ausgeht und von der Art und Weise ihrer „Produktion" im Organismus der Spinne, wird von allen geteilt. Für die Vertreter der Bionik ist es ein Leitbild, wie eine angepasste Produktion aussehen müsste. Im Hinblick auf angemessene bionische Herstellungsverfahren für Spinnenseide können die

Das Beispiel künstliche Spinnenseide

Meinungen dagegen weit auseinander gehen. Wenn das Gen für die Produktion von Spinnenseide in Ziegen eingepflanzt wird, die dann Spinnenseide in ihrer Milch produzieren sollen, geht dies einigen Bionikern deutlich zu weit. Auch die gentechnische Spinnenseideproduktion auf Basis des Bakteriums E. coli stößt bei einigen noch auf Skepsis.

Erhöhte Eingriffstiefe insbesondere bei nano- und gentechnologischen Anwendungen

Die Frage nach der Qualität, nach möglichen Risiken, Neben- und Folgewirkungen bestimmter Herstellungsverfahren ist allerdings keine Besonderheit des Beispiels Spinnenseide. Sie hängt eng mit den Möglichkeiten zur molekularen Gestaltung auf der Nanoskala und noch enger mit der Konvergenz zwischen Nanotechnologien und Bio- bzw. Gentechnologien zusammen. Die drastisch erhöhte Eingriffstiefe in biologische Systeme führt zu einer ebenso drastisch erhöhten Gestaltungsmacht – und diese Eingriffstiefe und Gestaltungsmacht ist naheliegender Weise dann auch mit höheren Risikopotenzialen und mit einer höheren Wahrscheinlichkeit von weit reichenden unerwünschten (und unerwarteten) Neben- und Folgewirkungen verbunden (vgl. zur Nanotechnologie Steinfeldt et al. 2007). Insbesondere im Bereich der Nanobiotechnologie und einer möglichen Nanobionik reichen die Ziele oft weit über die Nachahmung der Natur hinaus: Die Natur dient nicht allein als Vorbild für die Technikentwicklung, sondern es erfolgt ein Dreischritt: 1) Analyse der Natur (molekulare Maschinen), 2) Analyse der technischen Anpassungsnotwendigkeiten für industrielle Prozesse, 3) Anpassung der (molekularen Maschinen der) Natur an diese produktionstechnischen Vorgaben. In diesem Sinne gibt es einen Übergang von der Biomimetik (Technik nach dem Vorbild der Natur) zur „Technomimetik“ (biologische Systeme nach- bzw. umgebaut nach dem Vorbild der Technik). Damit lassen sich zwei Orientierungen unterscheiden mit vermutlich sehr unterschiedlichen Konsequenzen hinsichtlich der jeweils damit verbundenen Anwendungsperspektiven einerseits und Risikodimensionen andererseits: auf der einen Seite die Biomimetik, mit den biologischen Lösungen als Vorbild und auf der anderen Seite die Technomimetik, welche die Plastizität biologischer Systeme auslotet und diese technisiert (vgl. bspw. die Ansätze der synthetischen und systemischen Biologie). Für beide Richtungen gilt, dass der Hinweis auf „evolutionäre Erprobtheit“ immer weniger seine Berechtigung hat, je weiter die technische Lösung sich vom natürlichen Vorbild bzw. vom natürlichen Ausgangssystem entfernt.

»Technomimetik«

6.3 Themen, Akteure und Netzwerke – Ergebnisse der Literatur- und Patentanalysen

Deutsche Bionik-Community Vorreiter bei Vernetzung der Akteure

Eine Vorreiterrolle nimmt Deutschland in der Vernetzung der Bionik-Community ein. Aus dem zeitlichen „Verlauf der Publikationen und Patentanemldungen könnte man heraus lesen, dass die bisherige Netzwerkförderung die Sichtbarkeit der Aktivitäten erhöht und den Austausch untereinander z. T. auch mit den Unternehmen befördert hat. Derartige institutionalisierte Netzwerke gibt es mit Ausnahme von Großbritannien in anderen Ländern bisher noch nicht. Der eher kleine Kreis von explizit Bionik-Aktiven hat dadurch eine Kooperationsplattform (bzw. Teilplattformen) zur Verfügung, mit der einerseits die Bionik Idee verbreitet werden kann und zum anderen auch Schnittmengen zu Akteuren entwickelt werden können, die dem bionischen Ansatz zuzuordnen sind, deren Akteure sich aber bislang nicht der Bionik zugeordnet haben. Im nächsten Schritt wird es darum gehen die Akteure mit weitem Bionikverständnis zu integrieren. Die Entwicklung der Zahl der Netzwerkmitglieder kann als Indiz dafür gewertet werden, dass dies ansatzweise schon gelingt.

Kreis explizit Bionik treibender Akteure in Deutschland jedoch eher klein

Deutliche Zunahme von Literatur- und Patentveröffentlichungen zu Bionik – deutschland- und weltweit

Um Aufschluss über aktuelle Forschungsaktivitäten und den Stellenwert bionischer Ansätze in unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen und in unterschiedlichen Ländern zu erhalten, wurden eine Literaturanalyse und eine Patentanalyse durchgeführt. Für den Zeitraum ab 1990 ist eine deutliche Zunahme der Veröffentlichungen, ab 1995 auch der Patente mit direktem Bezug zum Begriff Bionik zu verzeichnen (Suchbegriffe bionic* und biomim*). Die Bionik spielt in sehr unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen eine Rolle, insbesondere in der Medizin, der Chemie, Biochemie und den Materialwissenschaften. Die meisten Patente wurden in der Chemie und Medizin angemeldet. Im internationalen Vergleich ist hinsichtlich der bionischen Forschung im engeren Sinn auf Basis dieser Literatur- und Patentanalyse allerdings keine besondere Stärke der deutschen Bionik festzustellen. Auch lassen sich auf diesem Wege keine besonderen Schwerpunkte der deutschen Bionik identifizieren. Dies deutet darauf hin, dass die Akteure in Deutschland, die sich selbst auf die Begriffe Bionik und Biomimetik beziehen, zwar gut vernetzt sind, ihre gute Vernetzung aber noch nicht hinreichend in internationale Publikationstätigkeit bzw. in Patente umsetzen.

Keine besondere Stärke der deutschen Bionik-F&E feststellbar

Eine Recherche mit den Suchbegriffen des weiten Bionikverständnisses („Lernen von der Natur“) (Suchbegriffe self repair*, self heal*, self organi* sowie „biolog* + inspir*“ und bioinspir*) ergab die meisten Publikationen in den Disziplinen Physik, Chemie, Computerwis-

senschaften und Materialwissenschaften. Deutsche Forschungseinrichtungen sind in diesen Bereichen sehr gut vertreten und übertreffen Japan, Frankreich und England. Unternehmen aus den USA und Japan sind besonders aktiv, was die Patentanmeldungen angeht. Von den deutschen Unternehmen macht sich vor allem der IuK-Bereich bemerkbar, insbesondere Siemens und Infineon.

Deutsche Akteure, die Ansätze des »Lernens von der Natur verfolgen«, eher schwach vernetzt

Die mit dem weiten Bionikverständnis durchgeführte Netzwerkanalyse erweckt allerdings den Eindruck, dass die Vernetzung der deutschen Forschungslandschaft im internationalen Vergleich unterdurchschnittlich ausgeprägt ist. Das mag mit darin einen Grund haben, dass die explizite Netzwerkförderung auf Akteure fokussiert, die sich unter dem engen Bionikbegriff versammeln. Die Akteure mit weitem Bionikverständnis werden auf diese Weise bisher nicht hinreichend erfasst. Die wirklichen Gründe sind allerdings aus der Datenlage nicht ableitbar.

Deutschland im Bereich »Lernen von der Natur« stark vertreten

Wenn man vom Vernetzungsgrad absieht, kann man bei den allgemeineren Ansätzen eines „Lernens von der Natur“ von einer besonderen Bionik-Stärke Deutschlands ausgehen. Deutschland ist bei den Publikationen sehr gut vertreten, aber ein geringerer Impact (Zitierhäufigkeit insb. im Vergleich zu Beiträgen aus England oder Frankreich) und eine deutlich geringere Patentanmeldeaktivität im Vergleich zu Japan relativieren dieses Bild.

Herausgehobene Bedeutung der Bionik für die naturwissenschaftlich technische Bildung und Ausbildung

Für die zukünftige Entwicklung der Bionik sind insbesondere auch der Bildungs- und Ausbildungssektor zu betrachten. Die Bionik besitzt ein großes Potenzial, Jugendliche für Naturwissenschaften und Technik zu begeistern. Dies ist von besonderer Bedeutung in einer Zeit, in der die naturwissenschaftlichen Fächer in der schulischen Ausbildung nicht besonders nachgefragt werden, in der aber die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen gerade wissenschaftlich-technisch gut ausgebildete Mitarbeiter nachfragt bzw. voraus setzt. Dem gegenwärtigen und sich zukünftig wahrscheinlich noch verschärfenden Mangel an Naturwissenschaftlern und Ingenieur könnte mithilfe von bionischen Lehrinhalten an Schulen – sowohl in der Primar- als auch der Sekundarstufe – erfolgreich entgegengewirkt werden. Die Mitglieder der (engen) Bionik-Community nutzen diese Chancen bereits. Sie sollten dabei unterstützt werden.

Bionik an Hochschulen: bisher nur teilweise vertreten

Die Situation im Hochschulbereich ist hingegen schwieriger zu beurteilen: Nur eine kleine Anzahl an Hochschulen bietet derzeit explizit bionische Lehrveranstaltungen an, was aber nicht ausschließt, dass es viel mehr Professuren gibt, die sich bionischen Themen widmen. Besondere Herausforderungen, die es bei der weiteren Integration der Bionik in die Ausbildung zu bewältigen gilt, sind die Interdisziplinarität und insbesondere die Nähe zu den Konvergenztechnologien. Der

Bionik (im weiten Sinne) wird allgemein ein großes Zukunftspotenzial zugesprochen. Zu ihrer Verankerung an den Hochschulen empfehlen Experten die Einführung von Aufbaustudiengängen, Projektförderung sowie die Einrichtung interdisziplinärer Forschungslaboratorien. Die Etablierung grundständiger Bionik-Studiengänge scheint von Seiten der Experten die weniger bevorzugte Alternative zu sein. Nichtsdestotrotz sollte vor einer endgültigen Bewertung eine umfassende Auswertung des bestehenden Studiengangs an der Hochschule Bremen erfolgen, da dort Bionik (im engen Sinne) sehr erfolgreich gelehrt wird.

6.4 Bionik und Innovationen

Viele Bionik-Innovationen erst im Forschungs- und Entwicklungsstadium

Viele bionische Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind über das F&E- bzw. Prototypenstadium nicht hinausgekommen. Unter den erfolgreichen Innovationen befinden sich zudem wenige weit reichende Innovationen, mit deren Hilfe neue Märkte erschlossen werden konnten, sondern eher inkrementelle Verbesserungsinnovationen.

Bevor nach Bionik spezifischen Treibern und Hemnnissen gesucht wird, muss zunächst einmal dargestellt werden, dass als die wichtigsten Treiber und Hemmnisse für bionische Innovationen diejenigen identifiziert werden können, die als Treiber und Hemmnisse für jegliche Innovationen bekannt sind. Innovationen werden ganz grundsätzlich von zwei Faktoren beeinflusst: der Entwicklung neuer (nicht nur) technischer Möglichkeiten („technology push") auf der einen und einem bestimmten Nachfragesog („demand pull") auf der anderen Seite. Beide Faktoren müssen zusammen kommen, damit überhaupt Innovationen entstehen und sich durchsetzen können. Zusätzlich wirken die staatliche Regulation, die Wettbewerbsbedingungen auf den einschlägigen Märkten sowie – mit Blick auf die Möglichkeiten zur Innovation – die Pfadabhängigkeiten auf der einen und die Gelegenheitsfenster auf der anderen Seite. Das heißt, wenn Innovationen aus der Bionik entweder erfolgreich oder nicht erfolgreich sind, dann besteht eine (sogar recht hohe) Wahrscheinlichkeit, dass der Erfolg oder Misserfolg wenig mit dem bionischen Ursprung oder Charakter der Innovation zu tun hat. Meist sind es Pfadabhängigkeiten, die dazu führen, dass sich Innovationen häufig nicht durchsetzen können, selbst wenn sie bestehenden Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen deutlich überlegen sind. Die zu ersetzenden Technologien sind in Systeme eingebunden, die sich um sie herum gebildet oder an sie angepasst haben. Die damit einhergehenden Systemträgheiten können nicht so ohne Weiteres überwunden werden.

Allgemeine Innovationstreiber und -hemmnisse wirken auch auf bionische Innovationen

»technology push« & »demand pull«

Pfadabhängigkeiten

Bionik spezifische Innovationstreiber und -hemmnisse

Trotzdem macht es natürlich Sinn nach Bionik spezifischen Innovationshemmnissen zu suchen. Vor dem Hintergrund unserer Kennntis des Feldes, der Interviews, Workshops und vor allem der Fallstudien, lassen sich folgenden Hypothesen bezüglich Bionik spezifischer Innovations- bzw. Transferhemmnisse formulieren. Da sind zunächst Probleme, die sich auf die Problematik der Übertragung (also auf den bionischen Abstraktionsprozess) beziehen. So ist z. B. die Hoffnung auf Vorbilder für Ressourceneffizienz einerseits sicher berechtigt, andererseits muss auch sicher gestellt sein, dass Übereinstimmungen hinsichtlich der jeweiligen „Knappheiten" bestehen. Ökosysteme bzw. die Evolution optimieren ggf. hinsichtlich anderer Knappheiten als Industriesysteme. Auch die Hoffnung auf ökologische bzw. evolutionäre Optimiertheit biologischer Lösungen hat ihrer Berechtigung. Es muss aber auch sicher gestellt sein, dass die Optimierungsparameter einigermaßen übereinstimmen, z. B. hinsichtlich 1) *Sicherheit*: Das Individuum zählt nicht im Evolutionsprozess. Das können (und wollen) wir uns bei der technischen Gestaltung und bei der Sicherheitsauslegung technischer Systeme auf keinen Fall leisten. 2) *Systemstabilität vs. Anpassungsfähigkeit*: Die Organismen sind den dauernden Umgebungsveränderungen mehr oder minder ausgeliefert. Die Fähigkeiten der Menschheit zur Gestaltung und Fixierung (technischer) Umwelten sind sehr viel größer. Im Verhältnis zwischen (mechanisch vorgegebener) Systemstabilität und Anpassungsfähigkeit könnte sich allerdings derzeit ein Paradigmenwechsel in Richtung auf eigensicherere, robustere und resilientere technische Systeme andeuten. In der längerfristigen Betrachtung wird auch das „lock-in" in ein ausgesprochen erfolgreiches Paradigma eine Rolle spielen. Lange Zeit wurde das industrielle Produktionsparadigma bestimmt durch das mechanistische Weltbild und eine sich daran orientierende mathematisch-experimentelle Naturwissenschaft (bspw. beliebige Wiederholbarkeit als Erfolgskriterium experimenteller Wissenschaft). Dies könnte sich aktuell ändern in Richtung auf einen angemesseneren „Umgang mit komplexen Systemen". Und schließlich düften auch kulturelle Schranken eine Rolle spielen zwischen wissenschaftlichen Schulen bzw. Herangehensweisen zwischen disziplinärem und interdisziplinärem Arbeiten, zwischen Reduktionismus und den Systemwissenschaften (Ganzheitlichkeit). Immerhin können einige dieser Thesen auch so gedeutet werden, dass in dieser Hinsicht die Bionik mit einigen ihrer bisherigen Ansätze nur „zu früh" dran war bzw. ist.

Der bionische Übertragungsprozess

Unterschiedliche Optimierungsparameter biologischer und technischer Systeme

»lock-in«

Umgang mit komplexen Systemen

Ergebnisse der Vertiefungsfallstudien

Die Vertiefungsstudien zu Optimierungsverfahren und Logistik sowie zur künstlichen Photosynthese wurden explizit unter der Fragestellung nach Innovationstreibern und -hemmnissen durchgeführt und förderten die folgenden Ergebnisse zu Tage.

Die bekanntesten bioanalogen Optimierungsverfahren werden augenscheinlich breit angewendet, auch wenn diese Anwendungen z. T. nicht immer gut dokumentiert sind. Eine besonders hohe wissenschaftliche Dynamik und Fruchtbarkeit ist derzeit weder bei den bioanalogen noch bei den konkurrierenden Verfahren zu erkennen. Aufgrund der stetig zunehmenden Komplexität in der Wirtschaft und vor allem auch in der Logistik hätten wir hier eigentlich mehr erwartet. Interviewpartner aus der Logistik erklärten diese Situation mit einem derzeit noch zu schwachen Problemdruck (bzw. einer zu schwachen Problemwahrnehmung). Die Unternehmen könnten ihre (Optimierungs-)Probleme derzeit noch mit einfacheren Mittel lösen und hätten eine gewisse Zurückhaltung mit Blick auf die nötigen Einarbeitungszeiten in komplexere Verfahren. Diese eher zurückhaltende Einschätzung des Markterfolges bionischer Ansätze bezieht sich allerdings auf die aktuelle Situation, in denen sich die bionischen Verfahren erst am Anfang der Entwicklung befinden und die bestehenden Verfahren ihre Optimierungspotenziale ausspielen können. Mit Blick auf die auch auf Rechenberg zurückgreifenden Ansätze bspw. des Organic Computing wird aber auch deutlich, dass im IuK Bereich ein umfassender Paradigmenwechsel ansteht, der nicht zuletzt auf Grund des Problemdrucks im IuK Bereich (zunehmende Komplexität und zunehmender Aufwand) sich den Weg bahnen wird. Die Marktfähigkeit entsprechender Systeme ist allerdings erst in mittlerer Frist zu erwarten.

Relativ breite Anwendung bioanaloger und bionischer Optimierungsverfahren

Allerdings eher schwache Nachfrage nach bionischen Optimierungsverfahren in der Logistik

Zunehmende Komplexität technischer Probleme erhöht die Bedeutung bionischer Optimierungsverfahren

Auch das Thema Energiegewinnung und -nutzung spielt innerhalb der einschlägigen Bionik-Literatur seit Jahrzehnten eine prominente Rolle und trotzdem sind auch auf diesem Gebiet bisher nicht besonders viele Ansätze bzw. Erfolge zu verzeichnen, die über das Stadium der Grundlagenforschung hinaus gekommen sind. Bei der Energiegewinnung und -nutzung haben wir es im Unterschied zum Verhältnis von Optimierungsverfahren und Logistik eher mit der Situation zu tun, dass der „Demand-Pull-Faktor“, der Bedarf an Alternativen, sehr viel stärker ist als die Fähigkeiten zur Entwicklung bionisch-technischer Lösungsansätze. Während bei den Optimierungsmethoden eher der Anschein entsteht, dass die bionischen Lösungen noch unzureichend nachgefragt werden, stößt bei der Energie der „Technology-Push-Faktor“ an seine Grenzen, weil die Entwicklung entsprechender Lösungen (Stichwort: „künstliche Photosynthese“) einfach sehr viel länger dauert, als man sich das ursprünglich vorgestellt hatte. Auch dieser Befund sollte keineswegs als „vernichtendes Urteil“ für die Bionik betrachtet werden. Wir begegnen ihm vielmehr in fast allen Bereichen von besonders forschungs- und technologieintensiven (High-Tech) Innovationen. Die Energieversorgung ist geprägt durch immense Pfad-

Bionische Energiegewinnung bisher eher ein Randthema innerhalb der Bionik

Verständnis biologischer Energiegewinnungsprozesse noch nicht ausreichend: Bsp.: Photosynthese

Pfadabhängigkeiten im Energiebereich besonders stark

abhängigkeiten. Man erinnere sich zudem beispielsweise an das bio- bzw. gentechnologische Projekt einer Verankerung der Fähigkeit zur biologischen Stickstofffixierung in weiteren Nutzpflanzen. Wir sind diesbezüglich offenbar heute von einer Lösung noch genauso weit entfernt wie zur Zeit der ersten großen öffentlichen Vermarktung dieses Vorhabens Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts.

Innovationshemmnisse

Bionik spezifische Innovationshemmnisse

Auch für die beiden Fallbeispiele lassen sich Bionik spezifische Innovationshemmnisse identifizieren:

Komplexitäts-match oder -mismatch

Unterschiede bestehen beispielsweise hinsichtlich der Komplexität der Prozesse und Strukturen, die als Vorbild dienen. Die Mechanismen beispielsweise, derer sich Ameisen bedienen, um im Kollektiv schnell und flexibel den kürzesten Weg zwischen ihrem Nest und einer Nahrungsquelle ausfindig zu machen, sind relativ einfach. Sie beruhen letztlich nur darauf, dass flüchtige Pheromonspuren gelegt und beim Verfolgen dieser Spuren einige sehr einfache Regeln befolgt werden. Die Fähigkeit zur Bewältigung hoher Komplexität (höhere Ebene) beruht also auf recht einfachen Prinzipien (niedrigere Ebene). Diese eher wenig komplexen Mechanismen konnten relativ leicht in entsprechende Optimierungsverfahren (Ameisen-Algorithmen) übertragen werden.

Bei der Photosynthese hingegen, die als Vorbild für bionische Verfahren zur Energiegewinnung dient, handelt es sich schon auf der physikalisch-chemischen Basisebene um hochkomplexe Strukturen und Prozesse, welche die Energie aus Photonen aufnehmen, weiterleiten und letztlich über eine Fülle von Zwischenreaktionen in chemische Energie umwandeln und speichern. Die Nachahmung der Photosynthese ist damit ein ungleich schwierigeres Unterfangen.

Als Fazit mit Blick auf Treiber und in diesem Fall besonders Hemmnisse bionischer Innovationen kann festgehalten werden, dass die Komplexität des Vorbilds bzw. noch genauer: die Verteilung von Komplexität im Vorbild, die Übertragbarkeit in technische Prozesse massiv beeinflusst.

Herauslösbarkeit von Teilfunktionalitäten

Ein weiterer Aspekt, der die Schwierigkeiten einer Übertragung vom natürlichen Vorbild in die technische Anwendung bestimmt, liegt in der Möglichkeit, Teilaspekte aus dem gesamten betrachteten bio-

logischen System zu extrahieren, zu isolieren und auf technische Systeme zu übertragen. Für Otto Lilienthal war bspw. der Durchbruch beim Versuch des Fliegens nach dem Vorbild des Vogelfluges erst dadurch möglich, dass er den Auftrieb vom Vortrieb analytisch trennte (sich dadurch von der Nachahmung des Flügelschlags verabschiedete) und sich ganz auf den Auftrieb (auf das Gleiten) konzentrierte. Bei den Bemühungen um eine künstliche Photosynthese sind derartige Herauslösungen derzeit nicht in Sicht. Noch ist offen, ob sie nur funktioniert (und auch nur dann als „bionisch" bezeichnet werden sollte), wenn dabei die Energie von solaren Photonen in chemisch gebundene Energie umgewandelt wird – im Idealfall unter Verwendung von Kohlendioxid und Wasser. Die Strukturen, Materialien und Prozesse der Photosynthese scheinen eine funktionelle Einheit zu bilden. Wird diese Einheit zerstört, indem einzelne Aspekte herausgelöst werden, scheint automatisch auch die Gesamtfunktion verloren zu gehen. Wenn man also bionische Innovationen auf einer Skala zwischen „Kopie der Natur" auf der einen und „Inspiration durch die Natur" auf der anderen Seite betrachtet, so kann festgehalten werden, dass sich der forschungs- und entwicklungsseitige Prozess der Umsetzung einer bionischen Idee in marktfähige Produkte und Verfahren umso schwieriger gestaltet, je stärker man an die Integrität bzw. funktionelle Einheit des natürlichen Vorbildes gebunden ist.

Nun funktioniert diese Übertragung allerdings (zum Glück!) nicht nur nach dem „alles oder nichts" Prinzip. Dennoch geht die Übertragung gewünschter Eigenschaften und Funktionen des biologischen Vorbilds oft mehr oder weniger zwangsläufig auch mit der Übernahme zumindest einiger auch unerwünschter Eigenschaften einher. Bekanntestes Beispiel ist das Interesse an biologisch abbaubaren Materialien, die für die Dauer ihres technischen Einsatzes stabil sein sollen. Auch Farbstoff basierte und andere organische Solarzellen zeichnen sich einerseits durch eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen Solarzellen aus, welche sie letztlich ihrem biologischen Vorbild zu verdanken haben. Sie können diffuses Licht nutzen, benötigen keine schwer zu beschaffenen Halbleitermaterialien, sind leicht und formbar, etc. Bio-organische Materialien sind zudem in der Regel gut biologisch abbaubar. Insofern ist es nicht überraschend, dass die Verwendung organischer Farbstoffe und anderer Materialien in organischen Solarzellen mit einer kürzeren Lebensdauer und einem relativ schnellen Abflachen der Leistungskurve über die Zeit einhergeht. Während Pflanzen und Photosynthese betreibende Bakterien die Strukturen, die an

der Photosynthese beteiligt sind, stetig erneuern und so eine konstante Leistung über einen sehr langen Zeitraum gewährleisten können, fehlen den organischen Solarzellen solche Möglichkeiten der Selbstreparatur und des Nachwachsens. Wie alle Innovationen müssen auch bionische Innovationen immer in der Summe ihrer relevanten Eigenschaften und Funktionen anderen, nicht-bionischen Lösungen wesentlich überlegen sein, wenn sie diese verdrängen wollen. Eine nicht isolierbare und deshalb notwendigerweise mit übertragene negative Eigenschaft kann so den Erfolg hoch interessanter Innovationen blockieren.

Innovationstreiber

Bionik spezifische Innovationstreiber

Bionik als Erweiterung des Suchraumes

In Bereichen, in denen offenbare Hemmnisse bestehen, Lösungen auf der Basis bestehender Ansätze bzw. Technologien zu generieren, scheint der bionische Ansatz als Orientierung einen wichtigen Stellenwert zu haben, indem der Problemlösungshorizont erweitert wird (Analogiebildung).

Bionik – positives Image neuer Technologien

Die Bionik verfügt über ein hochgradig positives Ansehen in der Öffentlichkeit. Insbesondere die in den vergangenen Jahren zahlreich erschienenen Bildbände und (populär)-wissenschaftlichen Sachbücher und auch eine Reihe von Fernseh- und Radiosendungen über Bionik machen deutlich, welch positives Image die Bionik transportiert. Aufgrund der Faszination, welche von den beachtlichen Leistungen natürlicher Organismen und deren Strukturen und Prozesse ausgeht, wird Bionik einerseits als eine moderne High-Tech-„Angelegenheit“ wahrgenommen. Andererseits verbinden sich mit der Bionik keine negativen Assoziationen, da die Natur, die meist als etwas Positives gesehen wird, der Bionik als Vorbild dient.

„Self-X“-Funktionalitäten und „Bottom-up“-Fertigungsparadigma

Die wesentlichen Treiber, die auch und vor allem für die Bionik im weiten Sinne („Lernen von der Natur“) bzw. für den dritten Strang einer Nanobionik einen Schub bedeuten könnten, dürften im Wesentlichen denjenigen ähneln, die auch die Entwicklungsdynamik der Materialwissenschaften, der Nanotechnologien sowie der Hard- und Software bei den Informations- und Kommunika-

tionstechnologien (Self-X) bestimmen. Die grundsätzliche Idee des „Bottom-up"-Ansatzes, die Option der Selbstorganisation bzw. des „Wachsen lassens" eröffnen für Nanotechnologien und Bionik gleichermaßen interessante Perspektiven. Der erwartbare Schub, die erwartbare Dynamik ist allerdings derzeit noch eher Technologiegetrieben. Die Nachfrageseite dürfte allerdings dort immer stärker ins Spiel kommen, wo sich in einer Reihe von Anwendungsfeldern die „Grenzen" herkömmlicher technologischer Ansätze zunehmend als Hemmschuh herausstellen und insofern die Suche nach neuen technologischen Optionen intensiviert wird.

Die Analyse der Technologieprognosen, die (Vertiefungs-) Fallstudien sowie die Diskussionen in den durchgeführten Workshops, aber auch die Interviews verdeutlichen, dass wesentliche Aspekte der technologischen Entwicklungsrichtung mit einigen Leitvorstellungen der Bionik eng verbunden sein können. In einer Vielzahl von Bereichen (Robotik, Materialwissenschaften, IKT) spielen bionische oder biomimetische Aspekte eine wichtige Rolle. Die Bionik erweist sich als hochgradig anschlussfähig in Bezug auf die Entwicklung neuer Technologien, technologische Entwicklungen und Marktanforderungen in unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen. Die erhöhten Anforderungen an die Adaptivität technischer Systeme und an die Fähigkeiten zur Komplexitätsbewältigung haben dem bionischen Zugang zumindest teilweise den Weg geebnet. Die Suchprozesse in Wissenschaftsbereichen wie Chemie, Materialwissenschaften, Nanotechnologien und Informations- und Kommunikationstechnologien führen zu im weitesten Sinne bionischen Ansätzen (u. a. Multifunktionalität, Selbstheilung etc.). In diesem Sinne dürfte sich die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass bionische Ansätze einen zunehmenden Einfluss auf die Gestaltung technischer Systeme der Zukunft haben wird.

Bionik als Wissenschaftsfeld

Neben den genannten Innovationstreibern und -hemmnissen, welche sich entlang des Innovationsprozesses identifizieren ließen, gibt es auch eine Reihe von Faktoren, welche auf die Bionik als Wissenschaftsfeld insgesamt wirken:

- *Die Bionik im engeren Sinne ist noch immer geprägt und getragen von einer kleinen Community und von Einzelpersonen*
- *Die Bionik als Feld verfügt nur über eine begrenzte Institutionalisierung. Dies gilt vor allem für den erweiterten Ansatz eines Lernens von der Natur*

- *Unternehmen sind gegenwärtig nur begrenzt in der Lage, Innovationsprojekte aus der Bionik zu verfolgen und umzusetzen*
- *Disziplinäre Traditionen und Zugänge erschweren die Durchsetzung bionischer Ansätze. Die Bionik stellt eine Verbindung von Wissenschaftsbereichen dar, die bisher sehr weit voneinander getrennt waren und es bis heute noch sind. Auch die (öffentliche) Forschungsförderung ist zumindest in den Grundlagen nahen Bereichen oft noch stark disziplinär orientiert*
- *Faszination Bionik auf der Ebene der Idee – Skepsis hinsichtlich der Wissenschaftlichkeit und Umsetzung – Was in der breiten Öffentlichkeit Faszination und Begeisterung auslöst, ruft in der Forschung und Entwicklung und bei Unternehmen bisweilen Skepsis hervor. Selbst exponierte Vertreter der Bionik verorten sich z. B. bei wissenschaftlichen Konferenzen noch bevorzugt in ihrer ursprünglichen Fachdisziplin.*

7 LITERATURVERZEICHNIS

7 LITERATURVERZEICHNIS

Abele, Th. et al. (2005): *Roadmap Prozess-Sensorik*. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik [Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure (VDI)] (2005): GMA-Kongress 2005 – Automation als interdisziplinäre Herausforderung [VDI-Berichte Nr. 1883]. Tagung, Baden-Baden, 7.-8.6.2005. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 695ff

Abicht, L.; Schlicht E.; Schumann, U. (2005): *Trendqualifikationen in der Nanotechnologie*. II Eingehende Darstellung. Schlussbericht im Rahmen des Projekts „Ermittlung von Trendqualifikationen im Bereich der Nanotechnologie". Halle.

Anderson, D. G.; Burdick, J. A.; Langer, R. (2004): *Smart Biomaterials*. Science, Vol. 305, S. 1923f.

Andreescu, S.; Omowunmi, A. S. (2004): *Trends and challenges in biochemical sensors for clinical and environmental monitoring*. In: PURE APPL CHEM, Vol. 76(4), S. 861-878

Antón, P. S.; Silberglitt, R.; Schneider, J. (2001): T*he Global Technology Revolution. Bio/Nano/Materials Trends and their Synergies with Information Technology by 2015*. RAND Corporation, Santa Monica.

Argyros, A. A. et al. (2004): *Biomimetic centering behavior – Mobile robots with panoramic sensors*. In: IEEE ROBOT AUTOMAT, Vol. 11(4), S. 21-31

Ayers, J. (2004): *Underwater walking*. In: ARTHROPOD STRUCT DEV, Vol. 33(3), S. 347-360

Ball, P. (2001): *Life's lessons in design*. Nature, Vol. 409, S. 413-416.

Ball, P. (2005): *Synthetic biology for nanotechnology*. Nanotechnology, Vol. 16, R1-R8

Bandyopadhyay, P. R. (2005): *Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles*. In: IEEE Journal of Oceanic Engineering, Bd. 30, H. 1, S. 109 139

Bannasch, R.; Yakovlev, S. (2006): *Maritime Technik: Von der Delphin-Kommunikation zum Tsunami-Frühwarnsystem*. In: Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenz-Netz e. V. BIOKON (2006): *Industriekongress BIONIK 2006 – Innovationsmotor* Natur. Berlin. S. 199ff

Bar-Cohen Y., (Ed.) (2005): *Biomimetics: Mimicking and being Inspired by Biology*. CRC Press.

Bar-Cohen, Y. (2001): *Nanotechnology Using Electroactive Polymers as Artificial Muscles*. MSTnews, International Newsletter on Microsystems and MEMS, Vol. 3/01, pp. 45-46

Bar-Cohen, Y. (2006): *Introduction to Biomimetics: The Wealth of Inventions in Nature as an Inspiration for Human Innovation*. In: Bar-Cohen, Y. (Hrsg.) (2006): *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL (USA).

Bar-Cohen, Y.; Breazeal, C. (Hrsg.) (2003): *Biologically Inspired Intelligent Robots*. SPIE Press, Bellingham.

Bensaude-Vincent, B. (2001): *Materials science and engineering: an artificial discipline about to explode?* Download from: http://www.sfc.fr/Material/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Bernadettespaperforhrst_files/intro(bbvhistMSE).htm

Bernhard, F. (2004): *Technische Temperaturmessung – Physikalische und meßsstechnische Grundlagen, Sensoren und Messverfahren, Messfehler und Kalibrierung.* Springer Verlag, Berlin et al.

Bico, J.; Marzolin, C.; Quéré, D. (1999): *Pearl drops*. Europhysics Letters 47, 220-226.

Biona-Report 8 (1992) *Technische Biologie und Bionik 1 / 1. Bionik-Kongress, Wiesbaden 1992*. Werner Nachtigall (ed.). Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Mainz.] G. Fischer, Stuttgart et al.

Bleckmann, H. et al. (2004): *Nature as a model for technical sensors*. In: J COMP PHYSIOL A, Vol. 190(12), S. 971-981

Blüchel, K G. (2006): *Bionik: Wie wir die geheimen Baupläne der Natur nutzen können*. Goldmann, München.

Blüchel, K. G.; Malik, F. (Hrsg.) (2006): *Faszination Bionik: Die Intelligenz der Schöpfung*. Bionik Media, München.

BMBF (Hrsg.) (2005): *Regenerative Medizin und Biologie. Die Heilungsprozesse unseres Körpers verstehen und nutzen,* Berlin.

BMBF (Hrsg.) (2006a): *Nanotechnologie – Innovationen für die Welt von morgen,* Berlin

BMBF (Hrsg.) (2006b): *Die Hightech-Strategie für Deutschland*. Bonn, Berlin.

BMBF (Hrsg.) (2005): *Innovationen aus der Natur – Förderkonzept Bionik*, Berlin.

Bogatyrev, N.R. (2004): *A "Living" Machine*. Journal of Bionics Engineering. Vol. 1(2), S. 79-87.

Braczyk, H. J.; Cooke P.; Heidenreich M.(eds.) (1998): *Regional Innovation Systems*. London

Bresnahan, T. F.; Trajtenberg M. (1996), *General purpose technologies: 'engines of growth'?*, Journal of Econometrics, Annals of Econometrics 65: 83-108.

Bretthauer, G. (2005): *Automatisierungstechnik – Quo vadis? Neun Thesen zur zukünftigen Entwicklung.* Automatisierungstechnik 53 (4-5), S. 155-157.

Bruck, H.A.; Gershon, A.L.; Gupta, S.K. (2004): *Enhancement of Mechanical Engineering Curriculum to Introduce Manufacturing Techniques and Principles for Bio-inspired Product Development*. Proceedings of IMECE 2004: 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, November 2004, Anaheim, Canada.

BSI (2003): *Kommunikations- und Informationstechnik 2010+3: Neue Trends und Entwicklungen in Technologien, Anwendungen und Sicherheit*, Download from: http://www.bsi.de/literat/studien/trend2010/

Carmena, J. M.; Hallam, J. C. T. (2004a): *Narrowband target tracking using a biomimetic sonarhead*. In: ROBOT AUTON SYSTEMS, Vol. 46(4), S. 247-259

Carmena, J. M.; Hallam, J. C. T. (2004b): *The use of Doppler in Sonar-based mobile robot navigation: inspirations from biology*. In: INFORM SCIENCES, Vol. 161(1-2), S. 71-94

Cerman, Z.; Barthlott, W.; Nieder, J. (2005): *Erfindungen der Natur: Bionik – Was wir von Pflanzen und Tieren lernen können*. Rowohlt Taschenbuch, Reinbek bei Hamburg.

Dargahi, J.; Najarian, S. (2005): *Advances in tactile sensors design/ manufacturing and its impact on robotics applications – a review*. In: Industrial Robot: *An International Journal*, Bd. 32, H. 3, S. 268 281.

Dario, P. et al. (2005): *Robotics as a future and emerging technology: Biomimetics, cybernetics, and neuro-robotics in European projects*. In: IEEE ROBOT AUTOM MAG, Vol. 12 (2), S. 29-45.

David, P. A. (1987): *Some new standards for the economics of standardization in the information age*, in: Dasgupta, Partha., Stoneman, Paul. (ed.): Economic policy and technological performance, pp.206-239.

de Casto, L.N. (2005): *Biological Inspired Computing. Presentation for the International Symposium on Bio-Inspired Computing.* Johor, MY, 6. September 2005. Deville, S; Saiz, E.; Nalla, R.K.; Tomsia, A.P. (2006): *Freezing as a Path to Build Complex Composites*, SCIENCE, Vol. 311, S. 515 – 518

Dickinson, M. H. (1999): *Bionics - Biological insight into mechanical design*. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 96(25), S. 14208-14209.

Dolata, U. (2004): *Unfassbare Technologien, internationale Innovationsverläufe und ausdifferenzierte Politikregime. Perspektiven nationaler Technologie- und Innovationspolitiken*. artec-paper Nr. 110 März 2004

Dosi, G. (1982): *Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change*, Research Policy, Volume 11, number 3, pp.47-162.

Edquist, C. (2001): *Systems of innovation*, in Michie (ed.), A Reader's Guide to the Social Sciences, Fitzroy Dearborn/Routledge, London.

Engin, M. et al. (2005): *Rescent developments and trends in biomedical sensors*. In: MEASUREMENT, Vol. 37(2), S. 173-188

Enterprise Management Associates (2006): *Practical Autonomic Computing. Roadmap to Self Managing Technology. A White Paper prepared for IBM*. Download from: www-03.ibm.com/autonomic/pdfs/AC_Practical-RoadmapWhitepaper_051906.pdf

ESA [European Space Agency] (Ed.) (2004): *Biomimicry – A Review* (prepared by Mark Ayre), download from: http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ACT_RPR_6000_BIO_Review_AYRE.pdf

Filliat, D. et al. (2004): *State of the Artificial Rat Psikharpax*. In: Schaal, S. et al. (Hrsg.) (2004): *From Animals to Animats 8 – Proceedings of the Eighth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. MIT Press, Cambridge et al., S. 3-12.

Foresight (ed.) (2000): *Materials: Shaping our Society – Materials Panel consultation recommendations*. Download from: http://www.foresight.gov.uk/Previous_Rounds/Foresight_1999__2002/Materials/Reports/Materials%20Shaping%20our%20Society/Report.pdf

Forth, E.; Schewitzer, E. (1976): *Bionik*. [Meyers Taschenlexikon]. VEB Bibliographisches Institut, Leipzig.

Franceschini, N. (2004): *Visual guidance based on optic flow: a biorobotic approach*. In: J PHYSIOLOGY-PARIS, Vol. 98(1-3), S. 281-292

Fratzl, P.; Gupta, H.S.; Paschalis, E.P.; Roschger, P. (2004): *Structure and mechanical quality of the collagen-mineral nano-composite in bone*, J.Mater.Chem., 14, 2115-2123

Freeman, C. (1987): *The 'National System of Innovation' in Historical Perspective*. In: D. Archibugi & J. Michie (eds): Technology, Globalisation, and Economic Performance, Cambridge University Press, Cambridge & New York.

Fritz, M.; Grathwohl, G.; von Gleich, A.; Kuntz, M.; Zinsmeister, K. (2005): *Perlmutt – Vorbild für nachhaltig zukunftsfähige Werkstoffe* (www.tecdesign.uni-bremen.de/FG10/documente/PerlmuttBericht.doc

Fromm, J. (2005): *Ten questions about emergence*. Technical report. Online: http://arxiv.org/abs/nlin.AO/0509049.

Fulk, K. (2002): *Biological Computing*. ISRC Future Technology Topic Brief, November 2002. Download from: http://www.uhisrc.com/futuretech.htm

Furukawa, T. (2004): *Biological Imaging and Sensing*. Springer Verlag, Berlin et al.

Gaffron, S. (2006): *Grüne Luftschlösser*. In: Technology Review [Deutsche Ausgabe], Jg. 2006, H. 11, S. 72 73.

Gausemeier, J. et al. (2005): *Domänenübergreifende Spezifikation der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme unter Berücksichtigung der auf das System wirkenden Einflüsse*. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik [Hrsg.: VDI Wissensforum IWB GmbH] (2005): Mechatronik 2005 – Innovative Produktentwicklung [VDI-Berichte Nr. 1892.1/2]. Tagung, Wiesloch, 1.-2.6.2005. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 315ff

Gérardin, L. (1972): *Natur als Vorbild: Die Entdeckung der Bionik*. [Bücher des Wissens]. Fischer Taschenbuch, Frankfurt a. M.

Gleich, A. von (1989): *Der wissenschaftliche Umgang mit der Natur – Über die Vielfalt harter und sanfter Naturwissenschaften* (Campus Forschung), Frankfurt/New York

Gleich, A. von (1998): *Was können und sollen wir von der Natur lernen?* In: von Gleich, A. (Hrsg.): *Bionik – Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. Teubner Stuttgart

Gleich, A. von (1998/99): *Ökologische Kriterien der Technik- und Stoffbewertung: Integration des Vorsorgeprinzips*. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung – Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, 10(6), 11(1/2).

Glenn, J.C.; Gordon, T.J. (2006): *2006 State of the Future*. American Council for the United Nations.

Goodsell, D.S. (2004): *Bionanotechnology: Lessons from Nature*. Hoboken (New Jersey)

Gorbunov, V. et al. (2002): *Biological thermal detection: Micromechanical and microthermal properties of biological infrared receptors*. In: BIOMACROMOLECULES, Vol. 3(1), S. 106-115

Grathwohl, G. (2004): *Neue Keramik: Aufbruch in Biosphäre und Nanowelt*, Bremer Universitätsgespräche, Dokumentation des 16. BUG am 30. und 31. Okt. 2003, Universitätsverlag Aschenbeck & Isensee, Bremen

Greguss, F. (1988): *Patente der Natur: Technische Systeme in der Tierwelt – Biologische Systeme als Modelle für die Technik*. Quelle & Meyer, Heidelberg/Wiesbaden.

Gründler, P. (2004): *Chemische Sensoren – Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. Springer Verlag, Berlin et al.

Grupp, H.; Dominguez-Lacasa I.; Friedrich-Nishio M. (2002): *Das deutsche Innovationssystem seit der Reichsgründung. Indikatoren einer nationalen Wissenschafts- und Technikgeschichte in unterschiedlichen Regierungs- und Gebietsstrukturen* (= Technik, Wirtschaft und Politik. Schriftenreihe des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI; 48), Heidelberg: Physica-Verlag

Hampp, N. (2005): *Bio – Nano – NanoBio: Chancen, Risiken, Visionen*. Folienvortrag auf dem 2. Nanotechnologieforum Hessen am 16. November 2005 in Hanau.

Hampp, N.; Noll F. (2003): *Nanobionics – from Molecules to Applications*. 293. WE Heraeus Seminar. Physik Journal 2(2), S. 56.

Herr, H.; Dennis, R.G. (2004): *A Swimming Robot Actuated by Living Muscle Tissue*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Vol. 1(6).

Herr, H; Whiteley G.; Childress D. (2003): *Cyborg Technology – Biomimetic Orthotic and Prosthetic Technology*. In: Bar-Cohen, Y.; C. Breazeal (Eds.): Biologically Inspired Intelligent Robots. SPIE Press, Bellingham, Washington.

Heynert, H. (1976): *Grundlagen der Bionik*. Dr. Alfred Hüthig, Heidelberg.

Higgins, C. M.; and Pant, V. (2004): A biomimetic VLSI sensor for visiual tracking of small moving targets. In: IEEE TRANS CIRCUIT SYST-I, Vol. 51(12), S. 2384-2394

Hill, B. (Hrsg.) (2006): *Bionik: Lernen von der Natur.* [Natur – Mensch – Technik]. Duden Paetec. Berlin/Frankfurt a. M

Honsel, G. (2006): *Wettkampf der Profile*. In: Technology Review [Deutsche Ausgabe], Jg. 2006, H. 11, S. 74 75.

Humpl, S.; Neuberger, R.; Nindl, S.; Öller, M.M.; Schamschule, R. (2006): *Aus- und Weiterbildung in Nanowissenschaften und Nanotechnologien – Bestands- und Bedarfserhebung in Österreich*. Wien.

Ichbiah, D. (2005): *Roboter: Geschichte, Technik, Entwicklung*. Knesebeck Verlag, München.

IEA [International Energy Agency] (2006): *Energy technology perspectives: in support of the G8 plan of action; scenarios & strategies to 2050*. Paris: OECD.

IEEE (2004): *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2004*. Piscataway, N.J. ISBN: 0780386418. Siehe auch im Internet: http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=10204

Ifmo [Institut für Mobilitätsforschung] (2006): *Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2025*. Berlin.

Institut für Technikfolgenabschätzung [ITA] (2006): *Bionik-Potential in Österreich*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie Österreich, Wien.

Jaax, K. N. and Hannaford, B. (2004): *Mechatronic design of an actuated biomimetic length and velocity sensor*. In: IEEE TRANS ROBOTICS AUTOMAT, Vol. 20(3), S. 390-398

Jacob K.; Beise, M.; Blazejczak, J.; Edler, D.; Haum, R.; Jänicke, M.; Loew, T.; Petschow, U.; Rennings, K. (2005): *Lead Markets of Environmental Innovations*. Physica-Verlag, Heidelberg.

Jackson, R. G. (2004): *Novel Sensors and Sensing*. IOP Publishing Ltd., Bristol, Philadelphia.

Joachim, C. (2005): *To be nano or not to be nano?* Commentary. Nature materials, Vol. 4, S. 107-109

Kanoun, O.; Tränkler, H.-R. (2004): *Sensor Technology Advances and Future Trends*. In: IEEE TRANS INSTRUM MEAS, Vol. 53(6), S. 1497-1501

Kasinger, H. (2005): *Ein MDA-basierter Ansatz zur Entwicklung von Organic Computing Systemen*. TR 2005-08 Institut für Informatik Universität Augsburg. April 2005

Kemp, R. (2001): *Possibilities for a Green Industrial Policy from an Evolutionary Technology Perspective*. In: M. Binder, M. Jänicke, and U. Petschow (eds.): Green Industrial Restructuring International Case Studies and Theoretical Interpretations, Springer: Berlin/ Heidelberg/ New York, 151-169

Kenny, T. (2005): *Basic Sensor Technology*. In: Wilson, J. S. (Hrsg.) (2005): Sensor Technology Handbook. Newnes (Elsevier), Amsterdam et al. S. 1-15

Kephart, J., D. Chess. (2003): *The Vision of Autonomic Computing*. Computer 36, 1 (Jan. 2003), 41-50.

Kesel, A. (2006): *Bionik*. Fischer Taschenbuch, Frankfurt a. M.

Key Technologies Expert Group (2005): *Creative System Disruption. Towards a Research Strategy Beyond Lisbon*. Draft Final Report. Download from: http://cordis.europa.eu/foresight/kte_expert_group_2005.htm

Kiener, U. (2005): *Zukunft Engineering. Eine Expertenbefragung in der Schweiz*. Studie im Auftrag des ETH-Rates und des Bundesamtes für Berufsbildung und Technologie. Winterthur.

König, A. et al. (2001): *Perspektive des Entwurfs verlustleistungsarmer integrierter Signalverarbeitung für intelligente Mikrosensoren in lernender Architektur*. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik [Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure (VDI)] (2001): *Automatisierungstechnik im Spannungsfeld neuer Technologien* [VDI-Berichte Nr. 1608]. Tagung, Baden-Baden, 22./23. Mai 2001. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 61ff

Kraismer, L. P. (1967): *Bionik: Eine neue Wissenschaft*. [Kleine naturwissenschaftliche Bibliothek, Reihe Physik, Bd. 4]. [2. Auflage]. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.

Kretschmer, Th. (2006): *Technologiefelder der Zukunft – Gesamtbild und Megatrends*. Folien zum Vortrag am 4. Innovationstag in Innsbruck, 30. November 2006.

Küppers, U. (2004): *Versuch einer Annäherung: Bionik und Wirtschaftlichkeit*. In: Biologie in unserer Zeit, Jg. 34, H. 5, S. 316 323.

Küppers, U.; Tributsch, H. (2002): *Verpacktes Leben – Verpackte Technik: Bionik der Verpackung*. Wiley VCH, Weinheim.

Langer, R.; Tirrell, D. A. (2004): *Designing Materials for Biology and Medicine*. Nature, Vol. 428, S. 487-492.

Lee, L.P.; Szema, R. (2005): *Inspirations from Biological Optics for Advanced Photonic Systems*, SCIENCE, Vol. 310, S. 1148 – 1150

Li, W. et al. (2001): *Tracking of fluid-advected odor plumes: Strategies inspired by insect orientation to pheromone*. In: ADAPT BEHAV, Vol. 9(3-4), S. 143-170

Liu, S.-C. et al. (2005): *Challenges and opportunities in the engineering of intelligent systems*. In: SMART STRUCT SYST, Vol.1(1), S. 1-12

Lundvall, B.-A. (ed.) (1992): *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, Pinter, London.

MacIver, M. A.; Nelson, M. E. (2001): *Towards a biorobotic electrosensory system*. In: AUTON ROBOTS, Vol. 11(3), S. 263-266

Mackensen, E.; Kuntz, W. (2004): *Intelligente, autarke Mikrosysteme für drahtlose Sensor-Aktor-Netzwerke*. In: VDI/VDE-Gesellshaft Mess- und Automatisierungstechnik [Hrsg.:Verein Deutscher Ingenieure (VDI)] (2004): *Sensoren und Messsysteme 2004* [VDI-Berichte Nr. 1829]. Tagung, Ludwigsburg, 15.-16.3.2004. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 307ff

Mann, S. (ed) (1996): *Biomimetic Materials Chemistry*, VCH Weinheim

Mann, S.; Werbb, J.; Williams, R. (eds) (1989): *Biomineralization, Chemical and Biological Perspectives*, VCH Weinheim

Marguerre, H. (1991): *Bionik: Von der Natur lernen*. Siemens Aktiengesellschaft, Berlin/München.

Mattheck, C. (1999): *Stupsi erklärt den Baum – ein Igel lehrt die Körpersprache der Bäume*. Verlag Forschungszentrum Karlsruhe, 3. Auflage.

Mattheck, C. (2003): *Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik*. Verlag Forschungszentrum Karlsruhe.

Mattheck, C. (2006): *Verborgene Gestaltgesetze der Natur*. Verlag Forschungszentrum Karlsruhe.

Mayer, G. (2005): *Rigid Biological Systems as Models for Synthetic Composites*, SCIENCE, Vol. 310, S. 1144 – 1147

McGruer, N. E. et al. (2002): *Biomimetic Flow and Contact/Bending MEMS Sensors*. In: Ayers, J. et al. (Hrsg.) (2002): *Neurotechnology for Biomimetic Robots*. MIT Press, Cambridge (Massachusetts). S. 13ff

MEFI [Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie] (ed.) (2006): *Technologies clés 2010*. Download from : http://www.tc-2010.fr/

Meier, H.; Smajic, H. (2005): *Entwurfs- und Projektierungswerkzeuge für intelligente und verteilte Aktor-/Sensorsysteme*. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik [Hrsg.: VDI Wissensforum IWB GmbH] (2005): *Mechatronik 2005 – Innovative Produktentwicklung* [VDI-Berichte Nr. 1892.1/2]. Tagung, Wiesloch, 1.-2.6.2005. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 1049ff

Meyer, J.-A. et al. (2005): *The Psikharpax project: towards building an artificial rat*. In: ROBOT AUTON SYST, Vol. 50 (4), S. 211-223.

Microsoft (2005): *Towards 2020* Science Report. Download from: http://research.microsoft.com/towards2020science/downloads/T2020S_ReportA4.pdf

Minai, A. A.; Braha, D.; Bar-Yam, Y. (2006): *Complex Engineered Systems: A New Paradigm*. In: Braha, D., Minai, A.A., Bar-Yam, Y., Complex Engineered Systems, Cambridge, Massachusetts: Springer, S. 1-21.

Minai, A. A.; Braha, D.; Bar-Yam, Y. (2006): *Complex engineered systems: A new paradigm*. S. 1-21.

Müller-Schloer, C. (2004): *Organic computing – on the feasibility of controlled emergence*. In: IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), Stockholm. S. 2-5.

Müller-Schloer, C.; von der Malsburg, C.; Würtz, R. P. (2004): *Organic Computing*. Informatik Spektrum 4 (2004), S. 2-6.

Nachtigall, W. (1998): *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer, Berlin et al. (2. Auflage 2002)

Nachtigall, W.; Blüchel, K. G. (2003): *Das große Buch der Bionik: Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur*. [Sonderausgabe]. Deutsche Verlags-Anstalt, München/Stuttgart.

Nachtigall, Werner (2002): *Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer, Berlin. 2. Auflage.

National Research Council of Canada (ed.), (2003): *Technology Foresight Pilot Projcect. BioSystemics Knowledge Manager's Synthesis Project*. Download from: www.moyak.com/researcher/nrc/BioSystemics.pdf

Nelson, R. (ed.) (1993): *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*. New York, Oxfrod.

NIDCR (Ed.) (2005): *Biomimetics and Tissue Engineering*. Download: www.nidcr.nih.gov

NIMS [National Institute for Materials Science] (Hrsg.), (2005): *Materials Science Outlook 2005*. Download from: http://www.nims.go.jp/eng/news/outlook/index.html

NISTEP [National Institute of Science and Technology Policy] (Hrsg.) (2005): *The 8th Science and Technology Foresight Survey. Delphi Analysis*. NISTEP Report No. 97, download from: http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/eng/rep097e/idx097e.html

Nordmann, A. (ed.) (2004): *Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies*. Report from the High Level Expert Group on "Foresighting the New Technology Wave".
Download from: www.ntnu.no/2020/final_report_en.pdf

Nsanze, F. (2005): *ICT Implants in the Human Body. A Review*. The European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission. Brussels.

OECD (ed.) (2006): *Infrastructure to 2030. Telecom, Land Transport, Water and Electricity*. Paris: OECD.

Oertel, D.; Grunwald, A. (2006): *Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik*. Vorstudie des Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Arbeitsbericht 108. Zum Download unter: http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab108.pdf

Paun, Gh. (2004): *Bio-Inspired Computing Paradigms (natural computing)*. Download at: http://upp.lami.univ-evry.fr/Documents/Paun/paun-biocom.pdf

Petschow, U.; von Gleich, A.; Haum, R.; Levina, O. (2005): *Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik. Themenfeld 2: Die Nähe zur Natur als Chance und als Risiko*. Studie im Auftrag des Deutschen Bundestages, vorgelegt dem Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin/Bremen 15/11/2005

Pettazzi, L.; Ayre, M.; Izzo, D. (2005): *Self-Assembly in Space Using Behaviour-Based Intelligent Components*. Internal Report. Prepared for ESA.

Popper, S. W.,; Wagner, C. S.,; Larson, E. V. (1998): *New Forces At Work: Industry Views Critical Technologies*. RAND Corporation, Santa Monica.

Priami, C. (2005): *Complexity and Systemics. Expert Report for the Expert Group "Key Technologies for Europe"*. Download from: http://cordis.europa.eu/foresight/kte_expert_group_2005.htm

Prock, J. (2004): *Selbstüberwachung und übergreifende Überwachung von Sensorsystemen der Verfahrenstechnik*. In: VDI/VDE-Gesellshaft Mess- und Automatisierungstechnik [Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure (VDI)] (2004): *Sensoren und Messsysteme 2004* [VDI-Berichte Nr. 1829]. Tagung, Ludwigsburg, 15.-16.3.2004. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf. S. 179ff

Prokop, A. (2001): *Bioartificial Organs in the 21st Century: Nanobiological Devices*. Annals of the New York Academy of Sciences, Vol.944.

Puccinelli, D.; Haenggi, M. (2005): *Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges of Ubiquitous Sensing*. In: IEEE Circuits and Systems MagazinMagazine, Vol. 5(3), S. 19-29

RGTF [Research Group of Technology Foresight] (ed.) (2005): *China's Report of Technology Foresight. Summary*. National Research CenterCentre for Science and Technology for Development, People's Republikc of China. Download from: http://www.foresight.org.cn/cbw/national%20technology%20foresight_03_04-051101.pdf

Roco, M. C.; Bainbridge, W. S. (eds.Hrsg.), (2002): *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. National Science Foundation. Download from: http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/

Rodriguez-Mozaz, S. et al. (2005): *Biosensors for environmental monitoring – A global perspective*. In: TALANTA, Vol. 65(2), S. 291-297

Rossmann, T.; Tropea, C. (2005a): *Vorwort der Herausgeber*. In: Rossmann, T.; Tropea, C. (Hrsg.) (2005): *Bionik: Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. Springer, Berlin et al.

Rötzer, F. (2001): *Robotfisch mit Froschmuskeln*. Telepolis 22.02.2001. Download at: www.heise.de/tp/

Ruffier, F.; Franceschini, N. (2005): *Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance*. In: ROBOT AUTON SYSTEMS, Vol. 50(4), S. 177-194

Rühle, M.; Dosch, H.; Mittemeijer, E. J.; Van de Voorde, M. H. (eds.) (2001): *European White Book on Fundamental Research in Materials Science*. Max-Planck-Institut für Metallforschung Stuttgart. Download: http://www.mpg.de/english/illustrationsDocumentation/documentation/europWhiteBook/index.html

Salo, A.; Cuhls, K. (2003): *Technology Foresight – Past and Future*. Journal of Forecasting, Vol. 22, S. 79-82.

Sanchez, C. (coord.) (2001): *Biomimétisme et Matériaux*. Arago 25. OFTA Paris.

Sanchez, C.; Arribart, H.; Giraud G.; Marie M. (2005): *Biomimetism and Bioinspiration as Tools for the Design of Innovative Materials and Systems*. Nature Materials, Vol. 4, S. 277-288.

Sartorius, C.; Zundel S. (eds.) (2005): *Time Strategies and Environmental Policy*. Edward Elgar Publishers (Celtenham)

Saxl, O. (2005): *Nanotechnology – a Key Technology for the Future of Europe*. Expert Report for the Expert Group "Key Technologies for Europe". Download from: http://cordis.europa.eu/foresight/kte_expert_group_2005.htm

Schanz, G. W. (2003): *Sensortechnik aktuell – Ausgabe 2003*: Trends, Produkte und Entscheidungshilfen. Oldenbourg Industrieverlag, München.

Schanz, G. W. (2004): *Sensortechnik aktuell – Ausgabe 2004*: Trends, Produkte und Entscheidungshilfen. Oldenbourg Industrieverlag, München.

Schanz, G. W. (2005): *Sensortechnik aktuell – Ausgabe 2005*: Trends, Produkte und Entscheidungshilfen. Oldenbourg Industrieverlag, München.

Schanz, G. W. (2006): *Sensortechnik aktuell – Ausgabe 2006*: Trends, Produkte und Entscheidungshilfen. Oldenbourg Industrieverlag, München.

Schenato, L. et al. (2004): *Attitude control for a micromechanical flying insect via sensor output feedback*. In: IEEE TRANS ROBOTICS AUTOMAT, Vol. 20(1), S. 93-106

Seeman, N. C.; Belcher, A.M. (2002): *Emulating biology: Building nanostructures from the bottom up*. PNAS, Vol. 99, Suppl. 2, S. 6451–6455.

Selverston, A. I. (2002): *Advances in the Development of Biomimetic Sensors, Actuators, and Controllers*. In: Ayers, J. et al. (Hrsg.) (2002): Neurotechnology for Biomimetic Robots. MIT Press, Cambridge et al., S. 4-10.

Settles, G. S. (2005): *Sniffers: Fluid-dynamic sampling for olfactory trace detection in nature and homeland security – the 2004 Freeman Scholar Lecture*. In: J FLUID ENG, Vol. 129(2), S. 189-218

Shahinpoor, M. (2003): *Ionic polymer-conductor composites as biomimetic sensors, robotic actuators and artificial muscles – an overview*. In: ELECTROCHIM ACTA, Vo. 48 (14-16), S. 2343-2353

Shahinpoor, M.; Kim, K. J. (2004): *Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications*. In: SMART MATER STRUCT, Vol. 14(1), S. 197-214

Shell International (ed.) (2005): *Shell global scenarios to 2025 : the future business environment; trends, trade-offs and choices*. London: Shell International Ltd.

Shin H.; Jo, S.; Mikos, A.G. (2003): *Biomimetic materials for tissue engineering*. Biomater, 24, 4353-4364.

SiemensForum/Landesmuseum für Technik und Arbeit (Hrsg.) (1999): *Bionik: Zukunfts-Technik lernt von der Natur* (Eine gemeinsame Wanderausstellung des SiemensForums München/Berlin und des Landesmuseums für Technik und Arbeit in Mannheim). [veränderter Nachdruck, Original von 1998]. SiemensForum, München/Berlin & Landesmuseum für Technik und Arbeit, Mannheim.

Silberglitt, R.; Antón, P. S.; Howell, D. R.;, Wong, A. (2006): *The Global Technology Revolution 2020, In-Depth Analyses. Bio/Nano/Materials/Information Trends, Drivers, Barriers, and Social Implications*. Rand Corporation, Santa Monica.

Sin ák, P. et al. (Hrsg.) (2004): *Machine Intelligence: Quo Vadis?* World Scientific Publishing, Singapore.

Skordos, A. et al. (2002): *A novel strain sensor based on the companiform sensillus of insects*. In: PHIL TRANS ROY SOC LONDON A, Vol. 360(1791), S. 239-253

Sörensen M. H (2004): *Ambient Ecologies- Toward biomimetic IT*. Ph.D. Dissertation, IT University of Copenhagen.

Sörensen, M.H. (2003): *Ambient Intelligence Ecologies*. Download from: http://www.itu.dk/people/megel/ambientIntelligenceEcologies.pdf

Specht, G. (2005): *Technologie- und marktorientierte Entwicklung von Bionik-Produkten*. In: Rossmann, T. & Tropea, C. (Hrsg.) (2005): Bionik: Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur, Ingenieur und Geisteswissenschaft. Springer, Berlin et al. S. 247 266.

Speck, O. (2006): *Schulversuche zur Bionik*. In: Hochschule Bremen (Hg.), Tagungsunterlagen. Bionik-Kongress in Bremen „Patente aus der Natur", 27/28 Oktober 2006.

Steinfeldt, M.; von Gleich A., Petschow U.; Haum R. (2007): *Nanotechnologies, Hazards and Resource Efficiency : A three-tiered approach to assessing the implications of nanotechnology and influencing its development*. Springer Verlag

Stevens, M.M.; George, J.H. (2005): *Exploring and Engineering the Cell Surface Interface*. Science, Vol. 310

Stibor, I. (ed.Hrsg.) (2005): *Anion Sensing*. Springer Verlag, Berlin et al.

Szentpétery, V. (2006): *Werkzeuge aus der Natur*. In: Technology Review [Deutsche Ausgabe], Jg. 2006, H. 11, S. 62 67.

TNS (2004): *Horizons 2020. A thought-provoking look at the future*. [TNS Infratest Wirtschaftsforschung 2004]. München.

Toko, K. (2000): *Biomimetic sensor technology*. Cambridge University Press, Cambridge et al.

Toko, K.; Habara, M. (2005): *Taste sensor*. In: CHEM SENSES, Vol. 30, Suppl. 1, S. i256-i257

Tränkler, H.-R.; /Obermeier, E. (Hrsg.) (1998): *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer Verlag, Berlin et al. ISBN: 3-540-58640-7.

Trumler, W. (2006): *Organic Ubiquitous Middleware*. Dissertation an der Universität Augsburg.

UMSICHT [Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik] (Hrsg.) (2005): *Bionik als Technologievision der Zukunft*. Studie im Auftrag des Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Zum Download unter: http://dip.bundestag.de/btd/16/037/1603774.pdf

Van Lieshout, M. et al. (ed.) (2006): *Converging Applications enabling the Information Society. Trends and Prospects of the Convergence of ICT with Cognitive Science, Biotechnology, Nanotechnology and Material Sciences*. Download from: http://fiste.jrc.es/pages/horizontal.htm

VDI-Technologiezentrum (Hrsg.) (Holtmannspötter, D.; Rijkers-Defrasne, S.; Glauner, C.; Korte, S.; Zweck, A.) (2006): *Aktuelle Technologieprognosen im internationalen Vergleich*. Übersichtsstudie. Zukünftige Technologien, Düsseldorf.

VDI-Technologiezentrum (Hrsg.) (Seiler, P.; Holtmannspötter, D.; Albertshauser, U.) (2004): *Internationale Technologieprognosen im Vergleich*. Übersichtsstudie. Zukünftige Technologien, Düsseldorf.

VDI-Technologiezentrum (Hrsg.) (Wevers, M., Wechsler, D.) (2002): *Nanobiotechnologie I: Grundlagen und technische Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme*. Zukünftige Technologien Nr. 38. Düsseldorf.

VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.) (Neumann, D.) (1993): *Technologieanalyse Bionik. Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien*. Düsseldorf.

Versweyveld, L. (2004): *U.S. Department of Veterans Affairs to fund new centre for advanced limb-loss research*. Virtual Medical World, 16.12.2004.

Vincent, J. F. V. et al. (2006): *Biomimetics: its practice and theory*. In: Journal of the Royal Society Interface, Bd. 3, Sp. 471-482.

Viollet, S.; and Franceschini, N. (2005): *A high speed gaze control system based on the Vestibulo-Ocular Reflex*. In: ROBOT AUTON SYSTEMS, Vol. 50(4), S. 147-161

Walter, A. (2005): *Technologietransfer*. In: Albers, S.; Gassmann, O. (Hrsg.) (2005): *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement*. Gabler, Wiesbaden. S. 101 118.

Webb, B. et al. (2004): *Sensorimotor control of navigation in arthropod and artificial systems*. In: ARTHROPOD STRUCT DEV, Vol. 33(3), S. 301-329

Weiss, P. (2003): *Channelling light in the deep sea*. Science news (164)

Wen, X.; Shi, D.; Zhang, N. (2005): *Applications of Nanotechnology in Tissue Engineering*. In: Nalwa, H. S. (ed.): *Handbook of Nanostructured Biomaterials and Their Applications in Nanobiotechnology*, Volume 1, S. 1–23.

Wengenroth, U. (2006): *Innovationskultur in Deutschland Rahmenbedingungen der Wissenschafts- und Technologiepolitik*. Diskussionspapier (Stand 14.07.2006)

Wieland, Th. (2006): *Innovationskultur: theoretische und empirische Annäherungen an einen Begriff*. In: Reinhold Reith et al. (eds.) *Innovationskultur: Modelle – Indikatoren – Transfer*. Innsbruck: StudienVerlag, 21-38.

Willis, D. (1997): *Der Delphin im Schiffsbug: Wie Natur Technik inspiriert*. Birkhäuser, Basel et al.

Winquist, F. et al. (2004): *Electronic tongues*. In: MRS BULL, Vol. 29(10), S. 726-731

WWF [World Wide Fund for Nature] (Hrsg.) (1991): *Bionik: Patente der Natur*. [Chefred. R. Witt; C.-P. Lieckfeld]. Pro-Fotura-Verlag, München.

Zeng, F. (2004): *Trends in Chochlear Implants. Trends in Amplification*, Vol. 8(1).

Zerbst, E. W. (1987): *Bionik: Biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen*. [Teubner Studienbücher der Biologie]. B. G. Teubner, Stuttgart.

Zeuch, M. (2006): *Bionik*. [Was ist was?, Bd. 122]. Tessloff, Nürnberg.

8 ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Felder des »molecular bioengineering« 61
Abbildung 2 Strukturierung des Feldes »Biokeramik« 63
Abbildung 3 Entwicklung der Konvergenztechnologien 75
Abbildung 4 Konvergenztechnologien und Bionik 81
Abbildung 5 Zugehörigkeit von Hochschulen, außeruniversitären F&E-Einrichtungen und Unternehmen zu den Netzwerken »BioKoN« und »KN Biomimetik« 112
Abbildung 6 Art und Grad der Vernetzung zwischen den einzelnen Hochschulen, außeruniversitären F&E-Einrichtungen und Unternehmen 114
Abbildung 7 Anzahl der Veröffentlichungen aus Deutschland zu den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« und Anzahl aller Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD von 1990-2005 119
Abbildung 8 Anteil der Veröffentlichungen aus Deutschland zu den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« an allen Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD von 1990 2004 120
Abbildung 9 Die 25 unter den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« meist publizierenden deutschen Institutionen 121
Abbildung 10 Anteil der Veröffentlichungen aus Deutschland zu den Begriffen »bionic*« oder »biomim*« an allen Veröffentlichungen aus Deutschland in den WSD von 1990-2004 123
Abbildung 11 Die 25 unter alternativen Bionik- Begriffen meist publizierenden deutschen Institutionen 124
Abbildung 12 weltweite Entwicklung der jährlichen Publikationen zu Bionik im engen Sinne 128
Abbildung 13 Länderverteilung der Literaturveröffentlichungen für den Zeitraum 1995 bis 2005 zu Bionik im engen Sinne 128
Abbildung 14 weltweite Entwicklung der jährlichen Publikationen zum weiten Bionikbegriff 129
Abbildung 15 weltweite Entwicklung der jährlichen Patentveröffentlichungen zu Bionik im engen Sinne 130
Abbildung 16 weltweite Entwicklung der jährlichen Patentveröffentlichungen zum weiten Bionikbegriff 130
Abbildung 17 Patentveröffentlichungen nach Ländern für den Zeitraum 1995 bis 2004 zum engen Bionikbegriff 132
Abbildung 18 Patentveröffentlichungen nach Ländern für den Zeitraum 1995 bis 2004 zum weiten Bionikbegriff 132
Abbildung 19 Literaturveröffentlichungen nach Wissenschaftsbereichen und Ländern zu Bionik im engen Sinn 133

Abbildung 20 Patentveröffentlichungen nach F&E-Bereichen zu Bionik im engen Sinne 134
Abbildung 21 Patentveröffentlichungen nach F&E-Bereichen zu den um »self-organi*«, »self-heal*«, »self-repair*« erweiterten Suchkriterien 134
Abbildung 22 Amerikanische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne« 138
Abbildung 23 Amerikanische Netzwerke zu »Lernen von der Natur« 138
Abbildung 24 Chinesische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne« 140
Abbildung 25 Chinesische Netzwerke zu »Lernen von der Natur« 140
Abbildung 26 Französische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne« 142
Abbildung 27 Französische Netzwerke zu »Lernen von der Natur« 142
Abbildung 28 Japanische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne« 144
Abbildung 29 Japanische Netzwerke zu »Lernen von der Natur« 144
Abbildung 30 Englische Netzwerke zu »Bionik im engen Sinne« 145
Abbildung 31 Englische Netzwerke zu »Lernen von der Natur« 145

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Definitionen von Bionik in der Literatur 15
Tabelle 2 Strukturierung der F&E-Felder der Bionik 39
Tabelle 3 Bionische Forschungsfelder mit Bezügen zu vielversprechenden Technologien aus den Technologieprognosen 41
Tabelle 4 Besonders dynamische Technologiefelder mit bionischen Anknüpfungspunkten 49
Tabelle 5 Strukturierung der Materialwissenschaften 59
Tabelle 6 Typisierung eines idealen technischen Systems 78
Tabelle 7 Hochschulen in den Netzwerken »BioKoN« und Kompetenznetz »Biomimetik« 88
Tabelle 8 Außeruniversitäre öffentliche oder gemeinnützige F&E-Einrichtungen in den Netzwerken »BioKoN« und Kompetenznetz »Biomimetik« 94
Tabelle 9 Unternehmen im Netzwerk »BioKoN« 95
Tabelle 10 Hochschulen in Deutschland mit bionischen Aktivitäten 97
Tabelle 11 Außeruniversitäre F&E-Einrichtungen in Deutschland mit bionischen Aktivitäten 102
Tabelle 12 Unternehmen in Deutschland mit bionischen Aktivitäten 106
Tabelle 13 Hochschulen mit Lehrveranstaltungen zu Bionik 148
Tabelle 14 Beispiele bionischer Entwicklungen und ihre Innovationsreife 166
Tabelle 15 ausgewertete Konferenzen und andere Veranstaltungen 226
Tabelle 16 Verwendete Institutionenkürzel und deren Bedeutung 227
Tabelle 17 Teilnehmer der Workshops im Rahmen der Studie 230
Tabelle 18 Interviewpartner 233

9 ANHANG

9 ANHANG

Tabelle 15 — Ausgewertete Konferenzen und andere Veranstaltungen

Titel der Veranstaltung	Datum	Ort	Veranstalter
VIII. Internationaler Bionik-Kongress	27.-28. Oktober 2006	Hochschule Bremen	GTBB
Symposium on Bioinspired Materials for the Chemical Industry	7.-9. August 2006	Strasbourg (Frankreich)	BASF
Bionik im Fahrzeug	20. Juli 2006	München	Euroforum
12. Internationale Sommerakademie in Ostritz-St. Marienthal: Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur	2.-7. Juli 2006	Ostritz	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, BioKoN
Bionik-Ausstellung im Museum der Natur, Gotha	1. Juli bis 15. Oktober 2006	Gotha	
Bionik-Kolloquium on Bio-inspired Textile Materials	17.-18. Mai 2006	Denkendorf	ITV Denkendorf, Kompetenznetz Biomimetik
Internationaler Bionik-Kongress für das Top-Management	9.-10. März 2006	Interlaken (Schweiz)	Malik Management Zentrum St. Gallen
Bionik Industriekongress	1.-2. März 2006	Berlin	BioKoN
Hannover Messe, Themenstand „Bionik“	in den Jahren 2002 bis 2005	Hannover	verschiedene
Fachtagung Bionik im Automobil	6.-7. Dezember 2005	Ulm	management information center GmbH
Deutscher Pavillon „BIONIS“ auf der EXPO 2005	25. März bis 25. September 2005	Aichi (Japan)	Organisation: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Kick-off-Meeting Marine Bionik: Wissenschaft trifft Wirtschaft	4. Februar 2005	Hochschule Bremen	HS Bremen, Fachrichtung Bionik
VII. Internationaler Bionik-Kongress	29.-30. Oktober 2004	Hochschule Bremen	GTBB
Bio[tech]nik - Investition Zukunft, Biologentag	1.-4. Oktober 2004	Bonn	Verband dt. Biologen und biowissenschaftlicher Fachgesellschaften e.V.

Titel der Veranstaltung	Datum	Ort	Veranstalter
Symposium Bionische Sensoren	12. Februar 2004	Darmstadt	Biotechnik-Zentrum der TU Darmstadt und DaimlerChrysler AG, Research and Technology, Sensotronics and Microsystems, Frankfurt/Main
VI. Internationaler Bionik-Kongress	5. und 6. Juli 2002	Universität des Saarlandes, Saarbrücken	GTBB

Tabelle 16 — Verwendete Institutionenkürzel und deren Bedeutung

Kürzel aus Datenbank, das in den Grafiken verwendet wird	ausgeschriebener Name
AF IOFFE PHYS TECH INST	A.F. Ioffe Physical Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg
CALTECH	California Institute of Technology
CHINESE ACAD SCI	Chinese Academy of Sciences
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rom
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique, Frankreich
DRESDEN UNIV TECHNOL	Technische Universität Dresden
ECOLE POLYTECH FED LAUSANNE	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
EUROPEAN MOL BIOL LAB	European Molecular Biology Laboratory
EUROPEAN SYNCHROTRON RADIAT FACIL	European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble
FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
FRAUNHOFER INST APPL POLYMER RES	Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung, Potsdam (Golm)
FREE UNIV BERLIN	Freie Universität Berlin
HAHN MEITNER INST BERLIN GMBH	Hahn-Meitner-Institut, Berlin
HANNOVER MED SCH	Medizinische Hochschule Hannover
HELSINKI UNIV TECHNOL	Helsinki University of Technology
HUMBOLDT UNIV	Humboldt-Universität zu Berlin
INDIAN INST TECHNOL	Indian Institute of Technology
INST MOL BIOTECHNOL	Institut für Molekulare Biotechnologie, Jena
KFA JULICH GMBH	Forschungszentrum Jülich GmbH
MASARYK UNIV	Masaryk University, Brno
MAX PLANCK INST BIOCHEM	Max-Planck-Institut für Biochemie, Martinsried (München)

→ Fortsetzung nächste Seite

Kürzel aus Datenbank, das in den Grafiken verwendet wird	ausgeschriebener Name
MAX PLANCK INST BIOPHYS CHEM	Max-Planck-Institut für Biophysik, Frankfurt am Main
MAX PLANCK INST COLLOIDS & INTERFACES	Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam (Golm)
MAX PLANCK INST EXTRATERR PHYS	Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching bei München
MAX PLANCK INST FESTKORPERFORSCH	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart
MAX PLANCK INST MED FORSCH	Max-Planck-Institut für medizinische Forschung, Heidelberg
MAX PLANCK INST MET RES	Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart
MAX PLANCK INST MIKROSTRUKTURPHYS	Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle (Saale)
MAX PLANCK INST MOL PHYSIOL	Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie, Dortmund
MAX PLANCK INST PHYS KOMPLEXER SYST	Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Dresden
MAX PLANCK INST PLASMA PHYS	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching bei München
MAX PLANCK INST POLYMER RES	Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz
MAX PLANCK INST STRAHLENCHEM	Ehem. Max-Planck-Institut für Strahlenchemie (jetzt bioanorganische Chemie), Mülheim an der Ruhr
MAX PLANCK INST STROMUNGSFORSCH	Ehem. Max-Planck-Institut für Strömungsforschung (jetzt Dynamik und Selbstorganisation), Göttingen
MOSCOW MV LOMONOSOV STATE UNIV	Lomonosov Moscow State University
MPG FRITZ HABER INST	Fritz Haber Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin
PAUL DRUDE INST FESTKORPERELEKT	Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik Berlin
PHYS TECH BUNDESANSTALT	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
POLISH ACAD SCI	Polish Academy of Sciences
RHEIN WESTFAL TH AACHEN	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
RUHR UNIV BOCHUM	Ruhr-Universität Bochum
RUSSIAN ACAD SCI	Russian Academy of Sciences, alle außer A.F. Ioffe
SIEMENS AG	Siemens AG
TECH UNIV BERLIN	Technische Universität Berlin
TECH UNIV BRAUNSCHWEIG	Technische Universität Braunschweig
TECH UNIV CHEMNITZ	Technische Universität Chemnitz
TECH UNIV DARMSTADT	Technische Universität Darmstadt
TECH UNIV ILMENAU	Technische Universität Ilmenau
TECH UNIV KAISERSLAUTERN	Technische Universität Kaiserslautern
TECH UNIV MUNICH	Technische Universität München
UNIV AUGSBURG	Universität Augsburg
UNIV BASEL	Universität Basel
UNIV BAYREUTH	Universität Bayreuth
UNIV BIELEFELD	Universität Bielefeld
UNIV BONN	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Kürzel aus Datenbank, das in den Grafiken verwendet wird	ausgeschriebener Name
UNIV BREMEN	Universität Bremen
UNIV CALIF SANTA BARBARA	University of California, Santa Barbara
UNIV CAMBRIDGE	University of Cambridge
UNIV COLOGNE	Universität zu Köln
UNIV DORTMUND	Universität Dortmund
UNIV DUISBURG ESSEN	Universität Duisburg-Essen
UNIV DUSSELDORF	Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
UNIV ERLANGEN NURNBERG	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
UNIV FRANKFURT	Johann Wolfgang Goethe-Universität
UNIV FREIBURG	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
UNIV GOTTINGEN	Georg-August-Universität Göttingen
UNIV HALLE WITTENBERG	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
UNIV HAMBURG	Universität Hamburg
UNIV HANNOVER	Leibniz Universität Hannover
UNIV HEIDELBERG	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
UNIV JENA	Friedrich-Schiller-Universität Jena
UNIV KARLSRUHE	Universität Karlsruhe
UNIV KIEL	Christian-Albrechts-Universität
UNIV KONSTANZ	Universität Konstanz
UNIV LEIPZIG	Universität Leipzig
UNIV LINZ	Johannes-Kepler-Universität Linz
UNIV MAGDEBURG	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
UNIV MAINZ	Johannes Gutenberg-Universität Mainz
UNIV MARBURG	Philipps-Universität Marburg
UNIV MUNICH	Ludwig-Maximilians-Universität München
UNIV MUNSTER	Westfälische Wilhelms-Universität
UNIV OLDENBURG	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
UNIV OSNABRUCK	Universität Osnabrück
UNIV PADERBORN	Universität Paderborn (früher Universität-Gesamthochschule)
UNIV POTSDAM	Universität Potsdam
UNIV REGENSBURG	Universität Regensburg
UNIV ROSTOCK	Universität Rostock
UNIV SAARLAND	Universität des Saarlandes
UNIV SO CALIF	University of Southern California, Los Angeles
UNIV STRASBOURG 1	Université Louis-Pasteur, Strasbourg
UNIV STUTTGART	Universität Stuttgart
UNIV TUBINGEN	Eberhard-Karls-Universität Tübingen
UNIV ULM	Universität Ulm
UNIV WURZBURG	Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Tabelle 17 — Teilnehmerliste der Workshops im Rahmen der BMBF-Studie »Potenziale und Trends der Bionik«

Titel	Name	Vorname	Institut/ Universität/ Unternehmen
	Albiez	Jan	Group for Robotics Universität Bremen FB3, DFKI Labor Bremen
	Affinass	Silke	Hochschule Bremen Internationaler Studiengang Bionik
Dr.	Bannasch	Rudolf	Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenz- Netz e. V. BIOKON
Dr.	Bargel	Hendrik	Biotechnik-Zentrum TU Darmstadt
Dipl.-Ing.	Bertling	Jürgen	Fraunhofer UMSICHT Leiter GF Spezialwerkstoffe
Dr.	Bovenschulte	Marc	VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Bereich Gesellschaft BMBF-Projektträger
	Braun	Knut	Koordinator BioKon Standort Universität d. Saalandes
Dr.	Burgert	Ingo	Max-Planck-Institute of Colloids and Interfaces Department of Biomaterials
Dr.	Dünne	Matthias	OHB-System AG
Dr.	Erb	Rainer	Deutsche Bundesstiftung Umwelt Projektleiter Zentrum f. Umweltkommunikation
PD Dr.	Fritz	Monika	Universität Bremen Inst. für Biophysik FB01 Physik u. Elektrotechnik
Dipl.-Ing.	Fechner	Sascha	DFKI Bremen Robotics Lab German Research Center for Artificial Intelligence
	Glöckner	Ole	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Dr.	Gößling- Reisemann	Stefan	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Prof. Dr.	Grathwohl	Georg	Universität Bremen FB Produktionstechnik Keramische Werkstoffe u. Bauteilen

Titel	Name	Vorname	Institut/ Universität/ Unternehmen
Dr.	Hache	Arnulf	Forschungszentrum Jülich GmbH PTJ – BMBF Projektträger
Prof. Dr.	Hampp	Norbert	Angewandte Biophysikalische Chemie Philipps-Universität Marburg
Dipl.-Wi.Ing	Häusler	Arno	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH (IÖW) Berlin
Dr.	Harder	Deane	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Plant Biomechanics Group Freiburg Competence Networks BIOKON and Biomimetics
Dr.-Ing.	Herdy	Michael	INPRO mbH Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie
Prof. Dr. Dr. h. c.	Heydemann	Berndt	Nieklitzer Ökologie- u. Ökotechnologie-Stiftung (NICOL) Institut f. Ökotechnologie an der Universität Rostock
Prof. Dr.rer. nat.	Heyser	Wolfgang	Universität Bremen Angewandte Botanik Physiologische Pflanzenanatomie
Dipl.-Ing.	Keil	Roland	BMBF Projektträger im DLR e.V.
Prof. Dr.	Kesel	Antonia	Hochschule Bremen Bionik-Innovations-Centrum (B-I-C)
Prof. Dr.	Kirchner	Frank	Group for Robotics Universität Bremen FB3, DFKI Labor Bremen
Dipl.-Biol.	Köhler	Bernhard	Biotechnik-Zentrum BitZ TU-Darmstadt
Prof. Dr.-Ing.	Labisch	Susanna	Hochschule Bremen Biomechanik u. Konstruktion
Dipl.-Ing.	Lutz-Kunisch	Birgit	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Prof. Dr.	Möhrle	Martin	Universität Bremen Forschungsgruppe Innovation und Kompetenztransfer (IPMI)
Dr.	Müller	Christian	Bundesministerium für Bildung und Forschung Ref. 615: Biotechnologie
Dr.	Müssig	Jörg	Faserinstitut Bremen e.V.
B.Sc.	Pade	Christian	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH (IÖW) Berlin

→ Fortsetzung nächste Seite

Titel	Name	Vorname	Institut/ Universität/ Unternehmen
Dipl.-Volksw.	Petschow	Ulrich	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH (IÖW) Berlin
M.A.	Pissarskoi	Eugen	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH (IÖW) Berlin
Prof. Dr.	Rahe	Detlef	Institut für Integriertes Design An der Hochschule für Künste Bremen
Prof. Dr.-Ing.	Rezwan	Kurosch	Bioceramics Fachbereich Produktionstechnik Universität Bremen
	Riechey	Juliane	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Dr.	Rischka	Klaus	Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – IFAM - Biomolekulare Oberflächen- u. Materialdesign
Dr. rer.nat.	Schilling	Cornelius	TU-Ilmenau Fakultät für Maschinenbau Institut für Mikrosystemtechnik, Mechanik und Mechatronik FG Biomechatronik
Prof. Dr.-Ing.	Schwefel	Hans-Paul	Universität Dortmund Informatik XI
Dipl.-Ing.	Stache	Michael	Technische Universität Berlin FG Bionik u. Evolutionstechnik
Dipl.-Ing.	Stührmann	Sönke	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
	Timmermann	Marlies	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Prof. Dr.	Tropea	Cameron	TU-Darmstadt Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik
	Uhlitzsch	Portia	Nieklitzer Ökologie- u. Ökotechnologie-Stiftung (NICOL) Institut f. Ökotechnologie an der Universität Rostock
Prof. Dr.	von Gleich	Arnim	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
	Wüst	Thorsten	Universität Bremen Fachbereich Produktionstechnik Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung

Tabelle 18 — Interviewpartner

Name	Einrichtung
Prof. Dr. Barthlott, Wilhelm	Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Universität Bonn
Dipl.-Ing. Bertling, Jürgen	GF Spezialwerkstoffe, Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
Prof. Dr. Epple, Matthias	Institut für Anorganische Chemie, Universität Duisburg-Essen, Duisburg
Dr. Erb, Rainer	DBU, Projektleiter Zentrum für Umweltkommunikation
Dr. Gorb, Stanislaw	MPI für Metallforschung Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. Grathwohl, Georg	Ceramics, Universität Bremen, Bremen
Prof. Dr. Grätzel, Michael	EPF Lausanne, Schweiz, Laboratory of Photonics and Interfaces
Prof. Dr. Hampp, Norbert	Angewandte Universität Marburg, Marburg
Dr. Herdy, Michael	INPRO- Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbh
Dr. Hinsch, Andreas	Fraunhofer-Institut für Solare Energietechnik, Leiter AG Farbstoff- und organische Solarzellen
Prof. Dr. Jeronimidis, George	Department of Engineering, Centre for Biomimetics, Reading University, UK
Dr. Koch, Dietmar	Ceramics, Universität Bremen, Bremen
Prof. Kopfer, Herbert	Uni Bremen – Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Dr. -Ing. Lefèvre, Jörg	DBU, Abteilung Umwelttechnik
Dr. Legrand, Andre-Pierre	EPSCI, Paris, Frankreich
Dr. Manjubala, Inderchand	Department of Biomaterials, Max Planck Institute of Colloids and Interfaces, Golm
Prof. Dr.-Ing. Müller-Schloer, Christian	Leiter des Fachgebiets „System- und Rechnerarchitektur“, Uni Hannover
Prof. Dr. Nachtigall, Werner	ehemals (bis 2002) Initiator und Leiter des Studiengangs „Technische Biologie und Bionik“ an der Universität des Saarlandes; heute Leiter des BIOKON-Standortes Saarbrücken
Prof. Dr. Rechenberg, Ingo	FG Bionik und Evolutionstechnik an der TU Berlin
Prof. Dr.-Ing. Rezwan, Kurosch	Ceramics, Universität Bremen, Bremen
Dr. Sander, Ulrich	Dr. Sander & Partner Managementberatung / Dr. Sander & Associates Software GmbH
Dr. Scharber, Markus	ehemals Johannes Kepler Universität Linz, Österreich, am Linzer Institut für organische Solarzellen (LIOS); heute bei KONARKA (Solarzellen-Unternehmen)
Prof. Dr. Schill, Kerstin	Leiterin der Arbeitsgruppe Kognitive Neuroinformatik, Uni Bremen
Dr. Schönberger, Jörn	Uni Bremen – Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Prof. Schulzt, Andreas	Massachusetts Institute of Technology – Sloan School of Management
Prof. (em.) Dr.-Ing. Schwefel, Hans-Paul	Emeritus Uni Dortmund, Lehrstuhl für Algorithm Engineering

→ Fortsetzung nächste Seite

Prof. Dr. Shackelford, James	Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of California, Davis, USA
Dr. Stegmaier, Thomas	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf; Leiter des Bereichs Technische Textilien/Oberflächentechnik/ Umwelttechnik sowie des Prüflabors Technische Textilien; Forschungsleiter Bionik
Dr. Treccani, Laura	Ceramics, Universität Bremen, Bremen
Prof. Dr. Tributsch, Helmut	Hahn-Meitner-Institut Berlin (Helmholtz-Gemeinschaft), Bereich solare Energetik
Prof. Vincent, Julian F.V.	Professor of Biomimetics, Dept. of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK
Dr.-Ing. Walter, Andre	Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT), Bremen
Prof. Dr. Waite, Herbert	Molecular, Cellular and Developmental Biology, University of California, Santa Barbara, USA
Dr. Wegst, Ulrike G. K	Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart
Prof. Dr. Weiner, Steve	Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
Dr. Wimmer, Thomas	Geschäftsführer der Bundesvereinigung Logistik (BVL)
Dr. Windt, Katja	Uni Bremen – Fachbereich Produktionstechnik
Dr. Würtz, Rolf P.	Institut für Neuroinformatik, Ruhr-Uni Bochum
Prof. Dr. Fu Zhai Cui	Biomaterials Lab, Tsinghua Universität, Beijing, China

BIONISCHE LÖSUNGEN FASZINIEREN. Die von Organismen entwickelten »technischen« Leistungen und Lösungen sind oft vorbildlich. Sie sind meist ressourceneffizient, ausgeklügelt, ökologisch angepasst und fehlertolerant, also tendenziell nachhaltig. Die Bewunderung für die Bionik scheint aber größer zu sein, als deren reale Erfolge. Es sind immer wieder die gleichen Erfolgsbeispiele, auf die Bezug genommen wird (Klettverschluss, Form des Flugzeugflügels, Wabenstrukturen im Leichtbau, Lotuseffekt etc.). Das »Lernen von der Natur« im Sinne einer Umsetzung der zahlreichen natürlichen Vorbilder in industriell einsetzbare Technologien stößt auf massive Probleme. Dies sind einerseits Probleme, die typischerweise im Zuge von Innovationsprozessen auftreten (Pfadabhängigkeiten), andererseits aber auch Bionik spezifische Probleme (Umgang mit Komplexität insbesondere mit Blick auf Systemarchitekturen, Materialien und Fertigungstechnologien). Aktuell steht die Bionik vor einem Entwicklungssprung, der – wie so oft in solchen Fällen – sowohl neue Chancen eröffnet als auch mit neuen Risiken verbunden ist.

Einerseits werden in vielen Bereichen technologische Grenzen erreicht, es geht zunehmend um den Umgang mit Komplexität. Bionische Ansätze bieten dabei Orientierungen, die bspw. im Bereich der Informations- und Kommunikations-Technologien, aber auch der »Industrial Ecology« und der Managementbionik zur Anwendung kommen. Andererseits werden Entwicklungen bspw. in der Molekularbiologie und in den Nanotechnologien maßgeblich zur Überwindung bisheriger Restriktionen bei der technischen Umsetzung »biologischer Lösungen« beitragen. Aktuelle Entwicklungsarbeiten an der Herstellung von künstlicher Spinnenseide, künstlichem Perlmutt, künstlichem Knochen- und Zahnmaterial eröffnen die Perspektive, hochkomplexe hierarchische Strukturen in Zukunft einfach »wachsen zu lassen«.

In der vorliegenden Studie werden die Trends, die kurz- und längerfristigen Perspektiven, die Stärken bzw. Schwächen der existierenden Bionik-Netzwerke und die aktuellen Treiber und Hemmnisse für bionische Innovationen ausgelotet sowie Lösungsansätze zu deren erfolgreicher Entwicklung und Durchsetzung skizziert.

ISBN 978-3-932092-86-2