

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik (Vorstudie)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses	4
Zusammenfassung	5
I. Einleitung	8
II. Charakterisierung der Bionik	11
1. Geschichtliche Entwicklung	11
1.1 Historische Beispiele	11
1.2 Die Entstehung einer systematischen Bionik	11
1.3 Aktuelle Entwicklungen und neue Bionik	12
2. Zur Definition der Bionik	12
2.1 Beispiele vorliegender Definitionen	12
2.2 Differenzierungen und Definitionsmerkmale	14
2.3 Die normative und die emotionale Seite der Bionik	14
2.4 Das Bionik-Verständnis in dieser Studie	15
3. Das Verhältnis von Natur und Technik in der Bionik	16
3.1 Bionik als Lernen von der Natur	16
3.2 Prinzipien der evolutionären Optimierung	17
3.3 Bionik als Nachahmung der Natur?	18
4. Fazit	19

	Seite
III. Bionik – ein Überblick	19
1. Forschungs- und Anwendungsfelder	20
2. Bionik in Deutschland	20
2.1 Forschungsfelder	20
2.2 Anwendungen und Marktpotenziale	21
2.3 Unternehmen	23
2.4 Patentsituation	23
2.5 Netzwerke	24
2.6 Lehre und Bildung	25
2.7 Forschungsförderung	26
3. Bionik im internationalen Umfeld	26
4. Fazit	27
IV. Bionik für neue Materialien	28
1. Begriffliches	28
1.1 Zum Begriff „neue Materialien“	28
1.2 Der Materialbegriff in der Bionik	29
2. Stand der Forschung	31
2.1 Bibliometrische Analyse	31
2.2 Forschungsgegenstand und Akteure	32
2.3 Ausgewählte Forschungsfelder	34
3. Ausgewählte Anwendungsfelder	38
3.1 Automobilbau	38
3.2 Bautechnik und Architektur	40
4. Chancen und Risiken	42
5. Fazit	42
V. Neue Bionik	43
1. Nanobionik	43
1.1 Begriffliches zur Nanobionik und ihrem Umfeld	43
1.2 Anwendungsgebiete	45
1.3 Chancen und Risiken	48
2. Neurobionik und Prothetik	49
2.1 Begriffliche Bezüge und Aspekte zur Einordnung	49
2.2 Ausgewählte prothetische Anwendungen	52
2.3 Trends, Chancen und Risiken	55

	Seite
3. Natural Computing	57
3.1 Aktuelle Herausforderungen	57
3.2 Variationen des „Natural Computing“	58
3.3 Risiken	59
4. Organisationsbionik	59
5. Fazit	61
VI. Weiterführende Aspekte und Handlungsempfehlungen	62
1. Forschungs- und Handlungsbedarf	63
Literatur	66
1. In Auftrag gegebene Gutachten	66
2. Weitere Literatur	66
Anhang	73
1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland	73
2. Unternehmen in Deutschland	78
3. Technologiezentren in Deutschland	81
4. Netzwerke in Deutschland	81
5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland	83
6. Unternehmen im Ausland	89
7. Netzwerke im Ausland	90
8. Universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, die im Bereich Materialien und Werkstoffe tätig sind	90
9. Tabellenverzeichnis	92
10. Abbildungsverzeichnis	92

Vorwort des Ausschusses

Der Kerngedanke der Bionik – das Übertragen von biologischen Lösungen auf technische Probleme – basiert auf der Grundidee, dass in der Natur in hunderten von Millionen Jahren durch evolutionäre Prozesse optimierte biologische Strukturen entstanden sind, die auch für technische Entwicklungen in der menschlichen Gesellschaft bedeutsam und überzeugend sein können. Die Natur mit ihrer Artenvielfalt und den jeweils individuellen Lösungen hält einen gigantischen Ideenpool für innovative Entwicklungen bereit.

Ein entscheidender Vorteil der Bionik ist, dass das Ergebnis „in natura“ bereits existiert, d. h. die prinzipielle Machbarkeit einer innovativen, neu angestrebten technischen Lösung nicht mehr nachgewiesen werden muss. Dennoch ist es aus Forschungssicht nicht trivial, überzeugend nachzuweisen, dass die Übertragung auch in dem betreffenden technischen Kontext funktioniert und zudem noch nachhaltig ist, denn bionische Lösungen werden für einen Einsatz in der menschlichen Gesellschaft aus dem ursprünglichen natürlichen Kontext herausgelöst. Damit verändern sich sowohl das Anforderungsprofil an die technische Lösung als auch die Folgen einer Umsetzung signifikant.

Das Potenzial bionischer Forschung wird international zunehmend erkannt. So betreiben die USA und Japan besonders intensiv bionische Forschung. Deutschland gehört in vielen Feldern der Bionik zur Weltspitze. Auch sind neuere Entwicklungen herauszuheben, in denen sich Überschneidungen mit bereits intensiv diskutierten Forschungsfeldern z. B. der Nanotechnologie abzeichnen. Beispielsweise sind mit der Nanobionik ganz neue Perspektiven einer naturnahen Forschung bzw. der Eingriffsmöglichkeiten des Menschen in die Natur zu diskutieren.

Im Schwerpunkt behandelt der vorliegende Bericht den aktuellen Stand und die zukünftigen Potenziale bionischer Forschung und Anwendung anhand ausgewählter Beispiele. Herausgearbeitet werden darüber hinaus wissenschaftlich-technische Handlungsfelder, die mit Blick auf positive Entwicklungs- und Anwendungschancen eine besondere Relevanz aufweisen.

Die vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) im Auftrag des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung erarbeiteten Ergebnisse liefern eine wertvolle Informationsgrundlage für die anstehende parlamentarische Befassung mit diesem faszinierenden und innovativen Thema.

Berlin, den 6. November 2006

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung

Ulla Burchardt, MdB

Ausschussvorsitzende

Axel E. Fischer, MdB

Berichterstatter

Sven Schulz, MdB

Berichterstatter

Uwe Barth, MdB

Berichterstatter

Dr. Petra Sitte, MdB

Berichterstatterin

Hans-Josef Fell, MdB

Berichterstatter

Zusammenfassung

Die Bionik versucht, mit wissenschaftlichen Mitteln „von der Natur“ für technische Problemlösungen zu lernen. Unter Bionik werden Ansätze in Forschung und Entwicklung verstanden, die ein technisches Erkenntnisinteresse verfolgen und auf der Suche nach Problemlösungen, Erfindungen und Innovationen Wissen aus der Beobachtung und Analyse lebender Systeme heranziehen und dieses Wissen auf technische Systeme übertragen. Der Gedanke des Übertragens von Funktions- oder Strukturwissen von lebenden auf technische Systeme ist zentral für die Bionik.

Bionik übt in der Öffentlichkeit vielfach eine große Faszination aus. Lebewesen als High-Tech-Systeme zu begreifen und über ihre „technologische Leistungsfähigkeit“ zu staunen, eröffnet die Möglichkeit, den häufig gesehenen Widerspruch zwischen Natur und Technik zu überwinden. Bionik „als Versprechen“ meint darüber hinaus, dass durch bionische Ansätze eine natürlichere, naturnähere oder besser angepasste Technik realisiert werden könne und dass damit bereits deswegen bessere Eigenschaften wie Einpassung in die natürlichen Kreisläufe, Risikoarmut, Fehlertoleranz und Umweltverträglichkeit möglich würden. Diese Überzeugung stellt für viele Bioniker eine wesentliche Motivation und eine zentrale Legitimation ihrer Ansätze dar.

Zur Begründung dieser Vorstellungen wird auf Eigenschaften von Problemlösungen in natürlichen lebenden Systemen hingewiesen, wie multikriterielle Optimierung unter variablen Randbedingungen, Nutzung des Vorhandenen oder geschlossene Stoffkreisläufe. Mit diesen Argumenten kann plausibel gemacht werden, dass bionische Problemlösungen entsprechende Potenziale haben. Ob diese Potenziale aber auch im Einzelfall realisierbar sind und unter welchen Umständen dies gelingen kann, dies bleibt zunächst offen. Bionische Problemlösungen sind daher nicht per se risikoärmer oder umweltverträglicher als traditionelle technische Lösungen. Denn eine evolutionäre Optimierung in der Natur erfolgt unter anderen Kriterien und Bedingungen als sie für eine technische Problemlösung relevant sind. Die Übertragung des Wissens, das an lebenden Systemen gewonnen wurde, in eine technische Umgebung ist kein trivialer Vorgang, der die Potenziale der Bionik zunichte machen oder sogar in Risiken transformieren kann.

Das Verhältnis der Bionik zur Natur ist daher gespalten. Natur hat in der Bionik einerseits Vorbildcharakter, interessiert aber andererseits nicht als Natur selbst, sondern eben „nur“ als Vorbild für technische Problemlösungen. Damit legt die Bionik einen technischen Blick auf die Natur nahe, der einem ursprünglichen „unmittelbaren“ Blick auf die Natur als Natur entgegengesetzt ist.

Die Bionik-Szene – ein Überblick

Verbindliche Einteilungen der Bionik liegen bislang nicht vor. Dadurch, dass der bionische Gedanke des Übertragens von Funktions- oder Strukturwissen von lebenden auf technische Systeme prinzipiell in wohl fast allen tech-

nischen Bereichen zum Zuge kommen könnte, gibt es keine eigene Systematik der Bionik. Zur klassischen Bionik gehören bionische Anwendungen in den Bereichen Bau und Klimatisierung, Konstruktionen und Geräte, Formgestaltung und Design, Verfahren und Abläufe, Materialien und Strukturen sowie Lokomotion. Ein wichtiges aktuelles Forschungsfeld mit erheblichem Anwendungspotenzial stellen neue Materialien dar. Die neue Bionik schließt an aktuelle Entwicklungen in Nanotechnologie und Evolutionsbiologie an. Sie umfasst einerseits molekularbiologisch inspirierte Mikroansätze der Nanobiotechnologie, der Prothetik und der neuronalen Steuerung, andererseits evolutionstheoretisch motivierte Entwicklungen in der Informationstechnik und in der Organisation kollektiver Prozesse.

Die deutsche Bionik-Forschung ist thematisch breit aufgestellt und hat eine sehr gute Ausgangsbasis. Die erforschten Segmente der Bionik und die Anwendungsfelder treffen weitgehend auf attraktive Märkte im In- und Ausland. Sowohl etablierte Felder (wie z. B. zu Neuen Materialien, funktionalen Oberflächen oder in der Konstruktion) als auch sich erst entwickelnde Bereiche der Bionik-Forschung (wie z. B. die Prothetik) sind darauf angelegt, innovative Beiträge zu gesellschaftlich und industriell relevanter Forschung und Entwicklung zu leisten. In der Öffentlichkeit ist das Attribut „bionisch“ positiv besetzt und wird gerne für Werbezwecke eingesetzt.

Neben den USA und Großbritannien, die ähnlich gut wie Deutschland aufgestellt sind, sind vor allem Frankreich, Schweiz und Österreich stark in der Bionik engagiert. Japan – besonders im Bereich Lokomotion und Robotik – und China (marine Bionik) erweitern ihr Engagement. Die Informationslage ist allerdings teils recht dürftig, besonders in Bezug auf Russland und die USA, da dort viele Bionik-Projekte in der Militärforschung angesiedelt sind und entsprechend der Geheimhaltung unterliegen.

Bionik in Deutschland ist durch Partnerschaft und Kooperation statt durch Konkurrenz und Wettbewerb geprägt. Dies zeigt die zentrale Bündelung der Kompetenzen im Netzwerk BIONIKON und die Zuordnung der Mitglieder in thematisch unterschiedlich ausgerichtete Fachgruppen, in denen der wissenschaftliche Austausch und die Nutzung von Synergien im Vordergrund stehen. Diese Bündelung ist auch eine Stärke im internationalen Vergleich. Während es in anderen Ländern häufig schwierig ist und langwierige Recherchen erfordert, Akteure und Projekte auf dem Gebiet der Bionik zu identifizieren, bietet der BIONIKON-Internetauftritt einen hervorragenden Überblick über die deutsche Bionik-Forschung, ihre Akteure und deren entsprechenden fachlichen Schwerpunkte sowie zahlreiche Links und Möglichkeiten zur Kontaktaufnahme.

Vielfach geht Bionik jedoch auf die Initiative und das Engagement einzelner Personen oder FuE-Einrichtungen zurück. Die kritische Masse für die Bionik, um den Innovationsprozess maßgeblich zu gestalten, ist weder national noch international erreicht. Zum einen liegt dies sicher daran, dass bionische Lösungsideen über eine sehr breite Palette von Anwendungsfeldern verstreut sind, so dass

der jeweilige Anteil und damit Einfluss in den – zumeist großvolumigen – Anwendungsfeldern gering bleiben muss. Zum anderen lässt sich auch eine Reihe von Hemmnissen für eine größere Rolle der Bionik im Innovationssystem ausmachen. Hierzu gehören vergleichsweise lange Entwicklungszeiten für bionische Produkte und Prozesse, eine gewisse Zurückhaltung bei der Industrie, Konflikte zwischen Universitäten und Industrie, eine zwar gestiegene, aber dennoch marginale Forschungsförderung, die weitgehende Abwesenheit der Bionik in der schulischen und universitären Lehre sowie ein Mangel an Kommunikation.

Neue Materialien

Biologische Materialien sind ressourceneffizient gestaltet und zeichnen sich durch eine hohe Stabilität und Funktionalität bei verhältnismäßig geringem Materialeinsatz aus. Die eingesetzten Materialien sind zudem in der Regel in der Umgebung leicht verfügbar (Opportunismusprinzip in der Materialauswahl). In der Natur finden sich keine Hochleistungswerkstoffe, sondern einfache Materialien mit einer effizienten inneren Struktur, die auf die jeweilige biologische Konstruktion perfekt abgestimmt sind und so aus technischer Sicht erstaunliche mechanische Eigenschaften erzielen.

Durch ihre Kombination als Mehrkomponentenmaterialien oder Composite zeichnen sich viele Materialien durch eine aus technischer Sicht ideale Kombination oft widersprechender Materialeigenschaften, wie Festigkeit und Elastizität, aus. Multifunktionalität stellt einen wesentlichen Beitrag zur Effizienz biologischer Materialien dar. Diese besitzen eine den Funktionen, die sie erfüllen sollen, angepasste Lebensdauer. Aufgrund der einfachen chemischen Basis sind alle Materialien biologisch abbaubar und damit Bestandteil eines natürlichen Kreislaufs. Um materialbionische Aspekte zu verdeutlichen, werden einige Forschungsfelder exemplarisch aufgeführt:

- Am Beispiel der Biokeramik werden Abgrenzungsprobleme deutlich, die einem praktischen Einsatz jedoch nicht entgegenstehen: Das Kristalline der Keramik (mit z. B. lebensfeindlichen Herstellungstemperaturen von über 1 000 °C) steht eher im Gegensatz zum Biologischen und Lebendigen. Mittlerweile repräsentiert die „Biokeramik“ einen hochdynamischen, äußerst vielversprechenden Zweig der keramikorientierten Materialwissenschaften.
- Ein weiteres Beispiel ist Perlmutter, welches im Fokus des Forschungsinteresses steht, weil es sich durch eine hohe Härte und gleichzeitig hohe Bruchfestigkeit auszeichnet. Perlmutter ist u. a. zäher als heutige Industriekeramik. Mögliche Einsatzgebiete werden auch im Bereich der Medizintechnik (Implantatwerkstoffe) gesehen, da heute verwendete nicht keramische Werkstoffe oft problematisch bezüglich ihrer Biokompatibilität sind.
- Von den anpassungsfähigen Materialien (smart materials) wird ein hohes Potenzial für technische Anwendungen erwartet. Selbstreparatur (Wundheilung) ist

ein anpassendes Merkmal aller Lebewesen. Untersuchungsergebnisse legen nahe, dass Selbstreparaturprozesse bei Pflanzen in technische Produkte umsetzbar sind. Derzeit werden z. B. selbstreparierende Membranen für technische Anwendungen entwickelt. Das Zusammenspiel von „Sensor, Steuereinheit und Aktuator“ kann genutzt werden für biologisch inspiriertes Laufen (Robotik, Biomechatronik).

- Bionisch strukturierte Beschichtungen bieten mittlere Eigenschaften, die weit über den bekannten Lotus-Effekt (Selbstreinigung in Verbindung mit Wasser) hinausgehen. Hier ist mittlerweile auch eine Reihe von Produkten auf dem Markt (z. B. Fassadenfarben, Antihafbeschichtungen, Riblet-Folien).
- Natürliche Klebelösungen sind technischen teilweise noch überlegen (z. B. Langzeithaften unter extremen Bedingungen wie etwa Salzwasser). Zudem sind alle in der Natur verwendeten Klebstoffe umweltverträglich. Daneben geht es auch um die Entwicklung wieder ablösbarer Verbindungen mit dem Ziel, feste Verbindungen von Werkstoffen ohne Schweißen oder Kleben aufzubauen.

Bei den aufgeführten Beispielen ist übergreifend anzumerken, dass, um auf der Basis naturwissenschaftlicher Aufklärung (z. B. molekularbiologischer Prinzipien) zu „technischen“ Lösungen zu kommen, die Grundlagenforschung in vielen Fällen noch eine „gewisse Reife“ erlangen sollte und bereits existierende Produkte weiter zu optimieren sind.

Die Zahl werkstoffbasierter Entwicklungen ist unüberschaubar, so dass eine Einordnung, was den Stand der Forschung anbelangt, schwierig ist. Dennoch ist festzuhalten, dass die Bionik bei zukünftigen Materialentwicklungen eine bedeutende Rolle einnehmen kann. Denn Eigenschaften natürlicher Materialien – wie adaptive Fähigkeiten, Multifunktionalität und ressourceneffizienter Aufbau – sind gleichzeitig auch Eigenschaften, die Ziele aktueller Werkstoffentwicklungen darstellen. Voraussetzung ist jedoch ein tieferes Verständnis für das Zusammenwirken von Funktion und Aufbau natürlicher Materialien sowie der Mechanismen zur Entstehung, Umformung und Selbstheilung.

In den Feldern Automobilbau und Bautechnik/Architektur kann Bionik unterschiedlich wirksame Beiträge zu (zukünftigen) Technologien leisten (z. B. Leichtbaukonstruktion nach bionischem Vorbild, strömungstechnische Optimierung der Fahrzeuge, Entwicklung spezieller Felgen und Reifenprofile, am Kraftfluss orientierte Tragstrukturen, transparente Isoliermaterialien). Dabei garantiert die unmittelbare „Nähe zur Natur“ – als Vorbildfunktion und als zumeist erster Verfahrensschritt bionischer Forschung – nicht per se einen nachhaltigen, heute oder zukünftig praxisrelevanten Einsatz. Ein sich abzeichnendes Charakteristikum umgesetzter bionischer Lösungen ist, dass sie eine hohe Anzahl neuer Entwicklungs- und Produktideen nach sich ziehen – nicht notwendigerweise ausschließlich bionischer Art. Dies zeigt das

Beispiel selbstreinigender, superhydrophober (besonders wasserabweisender) Oberflächen und Materialien.

Neue Bionik

Nanobionik und/oder Nanobiomimetik bezeichnen Forschungsaktivitäten, die Lösungsansätze der Natur (bzw. der Zelle) für menschliche Bedarfe und Herstellungsprozesse nutzbar zu machen. Diese Forschungsrichtungen sind molekularbiologisch orientiert und profitieren von Fortschritten in der Nanotechnologie. Entsprechende Entwicklungen befinden sich noch mitten im Stadium der Grundlagenforschung, auch wenn es um so konkrete Ziele geht, wie den technischen Nachbau der Photosynthese. Waren die bisher verfolgten bionischen Ansätze geprägt durch die Übertragung von Lösungsansätzen der Natur auf technische Systeme, so stehen im Rahmen der Nanobionik zugleich Eingriffe in die Natur auf dem Programm, die bis hin zum Bau künstlicher Zellen und damit letztlich zur Erzeugung künstlichen Lebens in der Synthetischen Biologie reichen. Die Analogiebildung der bisherigen Bionik mit der Nanobionik erweist sich spätestens dann als problematisch, wenn in die evolutiven Prozesse selbst eingegriffen wird, wenn also „der Mensch die Evolution selbst in die Hand nimmt“. Mit der dadurch einkehrenden Verkürzung der natürlichen Zeiträume, in denen sich evolutive Prozesse vollziehen, könnten neue Risikotypen erzeugt werden. Bei aller Faszination der Nanobionik sollte daher eine sorgfältige Begleitung durch Risikoforschung und Technikfolgen-Abschätzung erfolgen.

Die Fortschritte in der Prothetik tragen zu einer Entwicklung bei, die von der morphologischen Analogiebildung (beispielsweise Hörrohr) über eine völlige Abstraktion und Abkehr vom Vorbild wieder zu einer kontinuierlichen Annäherung an die natürlichen Prozesse gelangt – ganz im Sinne des „Nachbaus“ der zugrunde liegenden komplexen sensorischen und informationsverarbeitenden Mechanismen. Es geht damit zunehmend um die mehr oder weniger exakte funktionale Nachbildung der Natur. Dieses „transitorische“ Verständnis der Bionik (von der Analogie hin zur Kopie) lässt sich anhand von Arm- und Beinprothesen oder von Zahnprothesen illustrieren. Mit dem Fortschritt der Wissenschaft nehmen das Bestreben und die wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten zu, ganze oder zumindest Teile von Gliedmaßen in der erwünschten Funktion oder auch in der dabei natürlicherweise eingesetzten Funktionsweise nachzubilden. Hierbei sind große Erfolge zu verzeichnen, obwohl die exakte Kopie noch lange nicht erreicht ist. Die Neurobionik (z. B. Neuroprothetik, Biohybridelemente) wird von vielen Bionikern als bionisches Forschungsfeld akzeptiert, solange es um das Lernen von der Natur mit Blick auf evolutionäre Erkenntnisse geht. Andere grenzen sich jedoch von der Neurobionik für prothetische Anwendungen ab, da diese mehr auf den „Ersatz von Sinnen“ ausgerichtet ist. Durch die enormen Fortschritte im Verständnis biologischer Elemente sowie dem technischen Fortschritt im Bereich Miniaturisierung und Materialien ist zu erwarten, dass die Neurobionik dennoch in den kommenden Jahren eine klarere Rolle in der bionischen Forschung beanspruchen wird als bisher.

Die Nutzung evolutionärer Strategien ist ein weiteres aktuelles Forschungsfeld der Bionik. In der Informations- und Kommunikationstechnik operiert das „Natural Computing“ mit den Prinzipien von Variation und Selektion, um unter bestimmten Bedingungen „optimale“ Strategien durch Probieren herauszufinden. In Fragen der Organisation komplexen Verhaltens, sei es des Verhaltens eines Kollektivs oder des Verhaltens Einzelner angesichts kombinatorischer Optimierungsaufgaben, werden seit einiger Zeit Phänomene der „Schwarmintelligenz“ untersucht. Es geht dabei darum, das komplexe Verhalten z. B. von Ameisenvölkern oder Vogelschwärmen auf der Basis sehr einfacher Regeln auf der individuellen Ebene zu modellieren und hieraus Lösungsideen für Probleme sozialer Organisation zu gewinnen.

Grundsätzlich ist in diesen, technisch und wissenschaftlich sämtlich faszinierenden Feldern der „neuen Bionik“ zu beachten, dass erhebliche Potenziale für neuartige technische Möglichkeiten erkennbar sind, dass sich jedoch die Entwicklungen zum großen Teil noch in frühen Stadien befinden. Der bionische Gedankengang zielt hier zwar letztlich auf technische Problemlösungen, ist jedoch in der Regel noch weit von der Marktreife entfernt. Das häufig verwendete evolutionäre Prinzip der Selbstorganisation weist eine eigene Ambivalenz auf und könnte zu Risikotypen führen, die ihre Ursachen in einer zunehmenden Autonomie darauf aufbauender Technik und einem möglichen Kontrollverlust des Menschen haben.

Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen

Bionik führt zu einer erheblichen Ausweitung der „toolbox“ im Innovationssystem, indem aus der ungeheuren Vielfalt der „technischen“ Problemlösungen in der Natur für technische Problemlösungen in der Welt des Menschen gelernt wird. Bereits diese beträchtliche Erweiterung menschlicher Handlungsmöglichkeiten rechtfertigt eigene Anstrengungen, um das bionische Potenzial möglichst gezielt zu erschließen. Bionik „als Versprechen“ einer naturgemäßerer Technik trägt sicher zur Motivation vieler Forscher bei, ist jedoch für eine Begründung, warum denn Bionik betrieben und öffentlich gefördert werden sollte, gar nicht erforderlich. Hier reicht das Argument der Erschließung eines großen Ideenpools für menschliche Zwecke vollständig aus.

Für eine differenzierte Sicht auf die Bionik und die in diesem Bereich praktizierte Arbeitsweise ist es unabdingbar, den gesamten Innovationsprozess von den biologischen Grundlagen (Idee) bis hin zur technischen Umsetzung (Produkt) zu betrachten – auch um das Potenzial der Bionik realistisch darstellen zu können. Um Bionik als „Ideenpool“ für Innovationen zu etablieren, ist eine grundlegende Voraussetzung das Entwickeln von Strategien zum effizienten Herausfiltern der für technische Problemlösungen relevanten Aspekte. Aufgrund der ungeheuren Vielfalt der „natürlichen Problemlösungen“ wäre etwa eine weitere Systematisierung und Verfügbarmachung von Funktionsprinzipien aus der Biologie sinnvoll. Ein weiterer Punkt ist die Fokussierung der forschungsorientierten Förderung auf ausgewählte Aspekte (z. B. Wissensverwertung, Schutzrechtsstrategien, Aufbau neuer Förderschwerpunkte).

Eine funktionierende interdisziplinäre Arbeitsweise ist dabei ein zentraler Baustein bionischer Entwicklungen. Auch hier bestehen Verbesserungsmöglichkeiten in der Kommunikation zwischen verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen. Die momentan in Deutschland bestehende Netzwerkbildung sollte – auch mit Blick auf interdisziplinäre Aspekte und die europäische Ebene – weitergeführt werden.

Das Anwendungspotenzial der Bionik ist enorm breit. Ein entsprechendes Marktpotenzial ist vorhanden, wobei für ein detailliertes Bild allerdings entsprechende Marktuntersuchungen notwendig wären. Für den Transfer bzw. die Nutzbarmachung bionischer Entwicklungen für Umsetzungen im Handwerk bzw. im Mittelstand fehlen regionale bzw. auch überregionale Unterstützungsoptionen.

Die positive Besetzung des Begriffs „Bionik“ in der breiten Öffentlichkeit wäre ausbaubar, auch vor dem Hintergrund der Vermittlung eines noch klareren Bildes, was Bionik genau ausmacht. Dieses Verständnis wäre u. a. auch eine Grundlage für eine bessere Verankerung bionischer Aspekte in Lehre und Ausbildung.

Für eine Weiterführung der Bearbeitung des Themas böten sich folgende Vertiefungsfelder an:

- Untersuchung ökobilanzieller Themen im Rahmen von Gesamtbetrachtungen bionischer Produktanwendungen,
- Konkretion bisher getroffener Aussagen zu „Chancen und Risiken“ der Bionik insgesamt,
- Forschungsbedarf im Bereich der „neuen Bionik“ hinsichtlich der These „Bionik als Versprechen“ (Kontextüberprüfung, Kriterien, Bewertung etc.), Realisierbarkeit der mit Bionik implizit verbundenen Vorstellungen (Robustheit, Fehlertoleranz, Adaptivität usw.), Eingriffstiefe und Wirkmächtigkeit der „neuen Bionik“ auf molekularer Ebene und damit zusammenhängender Risiken sowie Detailuntersuchungen für einzelne Bereiche (z. B. Nanobionik, Prothetik),
- Durchführung einer differenzierten Vergleichsanalyse mit anderen Ländern (Benchmark),
- Untersuchung des potenziellen Beitrags der Bionik zu aktuellen ökologischen Problemen (z. B. im Bereich „Bauen und Wohnen“).

Deutschland gehört ohne Zweifel zu den bedeutenden Forschungsstandorten in der Bionik weltweit. Das wissenschaftlich hohe Niveau der deutschen Forschung gilt es, auch in Zukunft zu halten. Die internationale Reputation muss weiter gestärkt werden, und bionische Herangehensweisen sind nachhaltig und zeitnah in die Innovationsprozesse der Industrie zu integrieren. Es wird für die Zukunft zum einen darauf ankommen, das Wissen aus der bereits geleisteten Forschungsarbeit an die nächste Bionik-Generation weiterzugeben und vor allem durch Ausbildung einen Multiplikatorenprozess anzustoßen. Zum anderen muss die bionische „Denkweise“ stärker in Bildung und Ausbildung integriert werden.

Bionik bietet einen geeigneten Rahmen für einen gezielten und effizienten Wissenstransfer von der Grundlagenforschung bis hin zur technischen Anwendung. Dieser Wissenstransfer ist unerlässlich, um einen technologischen Wissensvorsprung auf Dauer zu halten. Vom derzeitigen Standpunkt aus betrachtet stellt die Bionik eine Technologieoption mit immensem Potenzial dar.

I. Einleitung

Die Grundidee des Übertragens von biologischen Lösungen auf technische Probleme (Bionik) besteht darin, dass in der Natur in hunderten von Millionen Jahren evolutionärer Prozesse optimierte biologische Strukturen entstanden sind, die auch für technische Entwicklungen bedeutsam und überzeugend sein können. In der Natur ist heute bereits eine immense Artenvielfalt (über 2,5 Mio. identifizierte Arten¹) mit ihren spezifischen Besonderheiten bekannt, die im Sinne der Bionik als gigantischer Ideenpool für technische Problemlösungen zur Verfügung steht. Somit geht es im weitesten Sinne quasi um einen Wissenstransfer von der Natur bzw. ihrer Analyse unter „technischem Blick“ in die Technik selbst. Zu beantworten ist jedoch noch eine Reihe von Fragen etwa nach einer adäquaten Vorgehensweise, um die in optimierten biologischen Strukturen verborgenen Informationen und gefundenen Lösungen für technische Anwendungen nutzen zu können (u. a. um Strategien zum effizienten Herausfiltern der für technische Problemlösungen relevanten Aspekte).

Auch heute gibt es noch eine Reihe von sehr grundlegenden technischen Fragestellungen, die bislang nicht befriedigend beantwortet sind (etwa Klebstoffe, die dauerhaft unter extremen Bedingungen (z. B. Salzwasser) haften oder das Bewegen/Haften von Minirobotern an glatten Oberflächen etc.). Da in der Natur Lösungen hierfür existieren, bietet es sich an, die entsprechenden Mechanismen genauer zu untersuchen und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf technische Anwendungen zu prüfen.

Ein Vorteil der Bionik ist, dass das Forschungsziel „in Natura“ schon existiert, d. h. die prinzipielle Machbarkeit der innovativen, neu angestrebten technischen Lösung muss nicht mehr nachgewiesen werden. Dennoch ist es aus Forschungssicht heute nicht trivial, überzeugend zu erläutern, dass die Übertragung auch in dem betreffenden technischen Kontext funktioniert. Denn bionische Lösungen werden für einen Einsatz in der menschlichen Gesellschaft aus dem ursprünglichen natürlichen Kontext herausgelöst. Damit verändert sich signifikant das Anforderungsprofil (Beispielsweise weist die technische Reproduktion der Haifischhaut, etwa für Schiffsrumpfbeschichtungen, ungünstigere mechanische Eigenschaften (Abrieb etc.) auf).

Eigentlich müsste die in der Natur vorgelebte Machbarkeit einen enormen Vorteil darstellen z. B. bei der FuE-Förderung oder als „Eintrittspforte“ für potenzielle

¹ Vermutet wird eine noch höhere Gesamtzahl (bis zu 30 Millionen), die auch bisher noch nicht identifizierte Arten von Lebewesen einschließt (<http://de.wikipedia.org/wiki/Artenvielfalt>).

(industrielle) Anwendungen. Ein Problem ist jedoch, dass der Weg (zum Ziel industrieller Anwendung) hier nur über eine breit angelegte Grundlagenforschung geht. (Screening der Möglichkeiten in der Natur, z. B. beim Antifouling: Warum werden Oberflächen generell gut oder schlecht besiedelt?) Zudem stehen biologische Entwicklungen immer in einem evolutiven Kontext, da Organismen beständig Anpassungsleistungen an ihre (sich ggf. ändernde) Umwelt erbringen müssen.

Als weiterer Vorteil für den Einsatz bionischer Überlegungen (neben der Artenvielfalt) wird oft die evolutionäre und damit optimierte Entwicklung biologischer Individuen benannt, welche optimal an das umgebende Ökosystem angepasst sind, wobei oft postuliert wird, dass es sich bei bionischen Lösungen um qualitativ „bessere“ als die bestehenden handelt. Kurt Blüchel schreibt dazu: „Wenn es gelänge, die genialen Erfindungen der Schöpfung als Innovationspool nutzbar zu machen, [...] würde sich das Gesicht der Welt vermutlich von Grund auf ändern. [...] Eine systematische Erkundung der Kompetenz biologischer Systeme durch den Menschen ist längst überfällig. Tausende neue, vor allem umweltverträglichere Produkte könnten dadurch geschaffen werden, zahllose Probleme in Gesellschaft, Wirtschaft und Industrie einer naturorientierten Lösung zugeführt werden“. (Blüchel 2005, S. 44) Aus dieser und anderen Quellen klingt eine gewisse Heilsbotschaft der Bionik heraus. Ob diese berechtigt ist und wie weit sie reicht, oder ob nicht durch bionische Vorgehensweise auch technische Risiken, vielleicht ganz eigener Art, verursacht werden können, wäre zu untersuchen.

Ein weiteres Diskussionsthema ist, dass Bionik als ein weit gefasster Begriff dasteht. Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten waren eher makroskopische Ansätze. Neue Dimensionen der Bionik zeigen sich seit einigen Jahren beim zunehmenden Übergang der Forschungsarbeiten auf die molekularbiologische Ebene. Dabei wird auch immer wieder diskutiert, wo genau der „Quantensprung zur Bionik“ zu finden ist (in Abgrenzung zum 1:1-Nachbau der Natur). Aktuelle Entwicklungen etwa der „Nanobionik“ stellen klassische Selbstverständnisse der Bionik und auch klassische Abgrenzungen, etwa zu Bio- und Gentechnologie, in Frage.

Bionik ist direkt oder indirekt in vielen Anwendungsfeldern zu finden; sie scheint dennoch häufig in der zweiten Reihe neben den „klassischen“ technischen Lösungen zu stehen – irgendwie oft „undercover“. Andererseits gibt es heute auch Produkte auf dem Markt, die fälschlicherweise mit bionischen Aspekten beworben werden. Generell kann man sagen, dass die industrielle Anbindung größtenteils (noch) offen ist: es herrscht eher eine abwartende Haltung vor. Man könnte hier auch eine Assoziation zur Grundidee der Kondratieffzyklen (Auftreten langweiliger Innovationszyklen) aufführen, die besagt, dass bereits vorhandene, aber bisher ungenutzte (und unbewusste) Ressourcen plötzlich ins allgemeine Bewusstsein treten und breite Bedeutung erlangen (bis hin zu einer ernsthaften wirtschaftlichen Nutzung). Dies ist bei der Bionik zwar (noch) nicht der Fall, aber zum einen ist eine

gewisse Renaissance zu verbuchen (von Ideen, die schon relativ lange existieren) und zum anderen wird vielfach davon ausgegangen, dass in dem als aktuell angenommenen Innovationszyklus biologische Anwendungen eine wesentliche Rolle spielen werden.

Bionik lebt in der öffentlichen Wahrnehmung von der Faszination einer „genialen Komplexität“, aber auch davon, dass Vieles in der Natur oft intuitiv verständlich ist. Dennoch braucht man oft relativ lange, um scheinbar einfache Dinge aufzuklären und diese dann für technische Anwendungen auch nutzbar zu gestalten. Diese Diskrepanz ist ein Ausgangspunkt für derzeitige Aktualität des Themas Bionik.

Gegenstand und Zielsetzung der Untersuchung

Vor diesem Hintergrund wurde – auf Vorschlag des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung – im Frühjahr 2005 die Bearbeitung dieses Themenfeldes als TA-Vorstudie begonnen. Ziel der Untersuchung ist eine Zusammenstellung des aktuellen Standes der Forschung und Anwendung im Bereich der Bionik anhand ausgewählter Beispiele. Dabei sollen Forschungsstrategien aufgezeigt sowie marktrelevante Aspekte dokumentiert werden. Eine vollständige Abbildung aller Forschungsarbeiten wird nicht angestrebt. Auf der Basis der Vorstudie soll ggf. über eine Weiterführung z. B. als TA-Projekt entschieden werden.

In der Vorstudie des TAB geht es zunächst um einen Überblick über den aktuellen Stand und die zukünftigen Potenziale bionischer Forschung und Anwendung. Berücksichtigt werden Chancen und Risiken der Bionik als eine Wissenschaft, die vielfach als eher risikoarm in ihren Folgen angesehen wird. Herausgearbeitet werden darüber hinaus wissenschaftlich-technische Handlungsfelder, die mit Blick auf positive Entwicklungschancen eine besondere Relevanz aufweisen. Auf der Basis von Literaturauswertungen und Experteninterviews wurden drei Themenfelder untersucht:

– *Aktuelle und zukünftig angedachte Nutzung bionischer Anwendungen*

In diesem Themenfeld geht es um eine Zusammenstellung verschiedener Anwendungsbereiche, die die Bandbreite bionikbasierter Entwicklungen abbildet. Neben heute bereits realisierten Anwendungen stehen insbesondere zukünftige Anwendungsfelder (insbesondere auch an Schnittstellen zu anderen Forschungsgebieten) im Vordergrund. Ausgangspunkt ist eine Differenzierung zwischen Anwendungen bzw. Forschungsarbeiten, die sich im engen und erweiterten Sinne als „bionikbasiert“ fassen lassen.

– *Die Nähe zur Natur als Chance und als Risiko*

Hier geht es um unterschiedlich wirksame Beiträge der Bionik zu (zukünftigen) Technologien. Dabei garantiert die unmittelbare „Nähe zur Natur“ – als Vorbildfunktion und als zumeist erster Verfahrensschritt bionischer Forschung – nicht per se einen nachhaltigen

gen,² heute oder zukünftig praxisrelevanten Einsatz. In diesem Themenfeld geht es um anwendungsübergreifende Aspekte, die zusammenfassend anhand ausgewählter, repräsentativer Anwendungsfelder dargestellt werden. Weiterhin werden ausgewählte Forschungsgebiete betrachtet, die zum einen nicht unbedingt auf eine relativ lange Tradition aufbauen können und zum anderen im Übergangsbereich (bzw. an sog. Schnittstellen) angesiedelt sind (z. B. Nanobionik, Bioinformatik). Da insbesondere der Verquickung verschiedener Wissensgebiete unter Aspekten der Multidisziplinarität mittlerweile eine hohe Bedeutung beigemessen wird, werden auch Bezüge der Bionik zum Themenfeld „converging technologies“ hergestellt.

– Internationale Aspekte bionischer Forschung

In diesem Themenfeld wurde die bionische Forschung unter einem internationalen Blickwinkel beleuchtet. Einbezogen wurden aktuelle Rahmenbedingungen auf EU-Ebene (z. B. europäisches Forschungsrahmenprogramm) sowie solche in weiteren Ländern (z. B. USA).

Aufbau der Studie

In der Summe wird in dieser Studie der Frage nachgegangen, was den bionischen Zugang zur Lösung technischer Probleme auszeichnet, in welchen Feldern aktuell die bedeutendsten Entwicklungen und Anwendungen erfolgen, welche Chancen und Potenziale in der Bionik liegen und mit welchen Risiken oder Gefahren zu rechnen ist. Dies kann, im Rahmen einer Vorstudie, sicher nur in einer begrenzten Detaillierungstiefe erfolgen. Es wird also den übergreifenden Fragen – wozu auch die begrifflichen Probleme gehören – eine große Aufmerksamkeit gewidmet und die sich daraus ergebenden Thesen und Fragen werden sodann in Form exemplarischer Vertiefungsfelder bearbeitet. Auf diese Weise ergibt sich folgender Aufbau des Berichts:

In Kapitel II geht es um die Charakterisierung der Bionik, angefangen von historisch herausragenden Entwicklungen, über die Entstehung einer systematischen Bionik bis hin zu aktuellen Entwicklungen im Sinne einer „Neuen Bionik“. Darauf aufbauend werden anschließend wesentliche Aspekte gängiger Bionik-Definitionen umrissen, um letztlich ein für diese Studie verwendetes Bionik-Verständnis zu formulieren. Unter diesem Blickwinkel wird dann auf das Verhältnis von Natur und Technik eingegangen, wobei neben den verschiedenen Blickwinkeln des „Lernens von der Natur“ auch Prinzipien der evolutionären Optimierung herausgestellt werden. Abschließend werden Aspekte der gängigen Erwartungshaltung diskutiert, dass eine Technik nach dem Vorbild der Natur auch automatisch risikoärmer und angepasster sei.

² Über die rein technische Lösung hinausgehenden Blickwinkel, wie energieeffiziente Gestaltung, Schutz natürlicher Ressourcen etc.

Im Kapitel III steht ein Überblick wesentlicher Forschungs- und Anwendungsfelder der Bionik im Vordergrund. Ziel ist es hier primär, einen Eindruck von der Vielfalt und den daraus erwachsenen potenziellen Schwierigkeiten der Einordnung und wirtschaftlichen Bewertung bionischer Anwendungen zu vermitteln. Fokussiert wird auf Aktivitäten in Deutschland in Bezug auf die industrielle Sicht, die Patentsituation, die Ausbildung von Netzwerken, Lehre und Bildung sowie die aktuelle Forschungsförderung. Abschließend werden Bezüge zum internationalen Umfeld aufgezeigt.

In Kapitel IV steht stellvertretend für den bereits etablierten Bereich der Bionik ein Querschnittsthema im Vordergrund, was sich durch fast alle Anwendungen durchzieht: die Neuen Materialien und Werkstoffe. Neben einer begrifflichen Einordnung in die Werkstoffthematik wird der Materialbegriff zunächst unter biologischen Gesichtspunkten diskutiert. Der Stand der Forschung wird anhand ausgewählter Forschungsfelder und deren Besonderheiten dokumentiert. Abschließend wird exemplarisch auf zwei Anwendungsfelder, den Automobilbau sowie Bautechnik und Architektur, eingegangen. In beiden Bereichen gibt es bereits bionisch inspirierte Umsetzungen sowie neue Ideen, bionische Aspekte einzubauen. Deutlich wird hier die Verbindung von Material und Konstruktion, die auch im Zusammenhang dargestellt wird. Abschließend werden Chancen und Risiken diskutiert.

Im Kapitel V wird explizit auf neue Forschungsfelder der Bionik eingegangen, die sich zum einen erst in den letzten Jahren heraus kristallisiert haben und zum anderen deutlich in den Grenzbereich anderer Wissenschaftsfelder (z. B. der Nanotechnologie) hineinreichen. Mit den hier exemplarisch aufgeführten Feldern Nanobionik, Bionik und Prothetik, Natural Computing sowie Organisationsbionik soll zunächst ein Spektrum aufgezeigt und inhaltlich umrissen werden.

In Kapitel VI wird dargelegt, welcher politische Handlungsbedarf und welche Handlungsoptionen sich hinsichtlich der bionischen Forschung sowie deren Etablierung in Industrie/KMU und Lehre/Bildung aus den Ergebnissen der Vorstudie ergeben. Abschließend wird auf potenzielle weiterführende Aspekte eingegangen.

In Auftrag gegebene Gutachten und Danksagung

Folgende Gutachten wurden im Rahmen dieses Projektes vergeben und sind in die Bearbeitung der Fragestellungen eingeflossen:

- Bionik als Technologievision der Zukunft: Status aktueller und zukünftiger Anwendungen; Bionik für neue Materialien in der Verfahrens-, Umwelt- und Bautechnik sowie im Fahrzeugbau; internationale Aspekte (Jürgen Bertling, Hartmut Pflaum, Marcus Rechberger, Manuela Rettweiler, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen)
- Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik, Themenfeld 2: Die Nähe zur Natur als Chance und als Risiko (Rüdiger Haum, Olga Levina, Ulrich Petschow,

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH (IÖW) und Arnim von Gleich, Universität Bremen, Technikgestaltung und Technologieentwicklung (TTE)

Den Gutachterinnen und Gutachtern sei an dieser Stelle ganz herzlich für ihre Arbeit gedankt. Sie bildet das Fundament für viele der in diesem Bericht getroffenen Einschätzungen. Im laufenden Text sind in den Kapiteln jeweils Verweise darauf enthalten, welche Passagen sich schwerpunktmäßig auf welche Gutachten stützen. Ein herzlicher Dank geht auch an die Expertinnen und Experten, die in diversen Expertengesprächen sowie bei der Beantwortung eines Fragebogens (beides organisiert von UMSICHT) signifikant zum Projekt beigetragen haben.

II. Charakterisierung der Bionik

Die Bionik steht als ein Verbindungsglied zwischen der Biologie und den Ingenieurwissenschaften quer zu den üblichen Einteilungen des Wissenschaftssystems. Abgrenzung und Definition sind kontrovers. In diesem Kapitel wird über eine historische Einführung zunächst ein anschaulicher Eindruck von der Bionik vermittelt (Kap. II.1), bevor Definitionen der Bionik diskutiert werden (Kap. II.2). Wesentliche Vorannahmen über das Verhältnis von Natur und Technik durchziehen die gesamte Bionik (Kap. II.3).

1. Geschichtliche Entwicklung

Bionik als, zunächst bewusst sehr allgemein formuliert, „Lernen von der Natur für technische Lösungen“ ist nicht neu. Die Bewunderung für zahlreiche „technische“ Leistungen der belebten Natur und die gleichzeitige Erfahrung des Unvermögens, diese mit den zur Verfügung stehenden Mitteln technisch nachzubilden (Forth/Schweitzer 1971), begleiten die Geschichte der Technik. Das folgende Kapitel zur geschichtlichen Entwicklung basiert vor allem auf dem Gutachten UMSICHT (2005).

1.1 Historische Beispiele

Das Verhältnis von Technik und Natur ist Gegenstand langer geistesgeschichtlicher und philosophischer Traditionen: „Technik vollendet teils das, was die Natur nicht erreicht, teils ahmt sie sie nach“ (Aristoteles). Die „Mimesis“ – dieser Begriff taucht auch in der Bionik des Öfteren auf – als technische Nachahmung der Natur ist danach möglich, weil Natur und Technik gleichermaßen durch die Orientierung auf Zwecke gekennzeichnet seien (Schmidt 2004). Dieses und andere Verständnisse von Nachahmung kennzeichnen die technikphilosophische Diskussion zum Verhältnis von Natur und Technik. So hat z. B. der Technikphilosoph Ernst Kapp Technik als die externe Nachbildung und Vervollkommnung menschlicher Organe verstanden – eine These, die der Anthropologe Gehlen zu der Auffassung radikalisiert hat, Technik diene der Kompensation der Defizite des „Mängelwesens Mensch“. Bionik als wenigstens teilweise Gegenthese zu der die Moderne prägenden Auffassung, Technik sei wesentlich „Gegennatur“ (Ropohl 1991), steht auf diese

Weise in einer langen Tradition der menschlichen Ideengeschichte.

Frühe Ansätze eines Gedankengangs, den man heute als bionisch bezeichnen würde, sind vor dem Hintergrund des alten Menschheitstraums vom Fliegen entstanden. So schrieb Leonardo da Vinci (1452 bis 1519) über den Vogelflug das klassische Werk „Sul vol degli uccelli“ und entwarf auf dieser Basis Fluggeräte, Hubschrauber und Fallschirme. Inspiriert von diesen Arbeiten Leonardos entwickelte der türkische Gelehrte Hezarfen Ahmed Celebi (1609 bis 1649) ein Fluggerät, mit dem er 1647 vom Galata-Turm in Istanbul über den Bosphorus nach Uskudar flog. Auch für Otto Lilienthal war der Vogelflug das Vorbild für menschliches Fliegen. Er studierte den Flug der Störche und führte mit den ersten erfolgreichen Flugapparaten in den Jahren 1891 bis 1896 Gleitflüge durch. Sein Buch „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“ (1889) ist ein Klassiker bionischer Literatur (Braun 2005). Auf Sir George Cayley (1773 bis 1857) gehen der Bau des ersten selbst stabilisierenden Flugmodells und die Entwicklung des ersten praktikablen Fallschirms zurück. Vorbild für sein Fallschirmmodell waren die selbst stabilisierend fallenden Früchte des Wiesenbocksbarts. Der Schwerpunkt dieser Früchte liegt weit unten und die tragende Fläche ist nicht eben, sondern nach außen hochgezogen. Auch bei Cayleys Fallschirm liegt der Schwerpunkt weit unten und die Tuchflächen werden an den Außenrändern nach oben hochgezogen (Braun 2005).

Ein Resultat bionischen Denkens ganz anderer Art ist der Stacheldraht. Der Osagedorn (*Maclura pomifera*) als mit Dornen versehener Strauch eignet sich hervorragend dafür, Vieh auf vorgegebenen Plätzen zu halten. Michael Kelly bildete 1868 das Prinzip aus Draht nach und patentierte es. Das bis heute wohl bekannteste bionische Produkt, den Klettverschluss, entwickelte 1948 der Ingenieur Georges de Mestral auf der Basis eines mikroskopischen Studiums der Klettenfrucht. Die technische Lösung meldete er 1951 zum Patent an und vermarktete das Produkt unter dem Namen Velcro®. Ein in der Nachahmung natürlicher Vorbilder analoges Beispiel aus der aktuellen Forschung besteht darin herauszufinden und dann möglichst nachzubauen, wie manche Tiere, etwa Geckos oder einige Spinnenarten, glatte Wände herauf und herunter laufen können, ohne sich festzusaugen (Strassmann 2005). Das Gemeinsame an diesen Beispielen ist, dass es – in ganz verschiedener Weise und auf verschiedenen Ebenen – um die Generierung und Umsetzung einer technischen Lösungsidee auf der Basis der Beobachtung und Analyse natürlicher Vorbilder geht.

1.2 Die Entstehung einer systematischen Bionik

Die Anfänge der Bionik bestehen, wie beschrieben, aus Einzelfällen, in denen phänomenologisch das biologische Vorbild beobachtet und kreativ in einer technischen Nutzung eingesetzt wurde. Das „Lernen von der Natur“ erfolgte dabei zumeist auf Basis offensichtlicher Analogien, die bereits dem Nichtfachmann aufgrund der

äußeren Gestalt des biologischen Vorbildes oder leicht sichtbarer Effekte eine technische Nachahmung nahe legen (wie z. B. im Falle des Stacheldrahts oder des Vogelzugs).

Wilhelm Ostwald (1929) diskutierte als erster systematisch den Beitrag, den die Biologie für die Technik leisten kann. Ohne konkrete Beispiele oder die methodische Vorgehensweise zu benennen, sah er – vor dem Hintergrund des zunehmenden Steuerungsbedarfs in technischen und unternehmerischen Prozessen und einer drohenden Ressourcenverknappung – die Einbeziehung der Biologie in technische Entwicklungsprozesse als Zukunftschance zur Bewältigung komplexer Problemstellungen an. Aspekte der Energiebeschaffung, der Steuerung und Organisation standen dabei im Mittelpunkt.

Etwa um 1950 begann der Aufbau einer modellbasierten Bionik, die sich vor allem auf makroskopischer Ebene im Flugzeug-, Fahrzeug- und Schiffsbau durchsetzte. Auf der Basis von Ähnlichkeitsüberlegungen übertrug sie Prinzipien von biologischen Vorbildern auf technische Ausführungen. Zum Beispiel wurde als biologisches Vergleichsobjekt zum Verkehrsflugzeug der Wal herangezogen (Hertel 1967). Strömungstechnische Optimierungen der Form von Fortbewegungsmitteln oder von Propeller- und Windradkonstruktionen stellen bis heute einen der wichtigsten bionischen Forschungsbereiche dar (von Gleich 2001). Damit wurden nicht triviale Analogien und die Übertragung von Prozess- und Strukturkenntnissen aus der belebten Natur in die Technik kennzeichnend für die moderne Bionik (Forth/Schweitzer 1971). Zu ihr gehören daher ein vertieftes Verständnis der biologischen Strukturen und Prozesse sowie eine entsprechende Modellbildung.

Parallel zur Einführung des Begriffs „Bionik“ wurde es durch begriffliche und methodische Angebote aus Systemtheorie und Kybernetik möglich, Steuerungs- und Regelungsprozesse in Natur und Technik parallel zu betrachten. Damit setzte ein wissenschaftlich fundierter systematischer Informationstransfer zwischen Biologie und Technik ein. Informations- und regelungstechnische Themen, wie verbesserte Ortungsverfahren, automatische Spracherkennung, Modelle zur Beschreibung des Gesamtsystems Mensch-Flugzeug, Verfahren zur Bildverarbeitung, dominierten um 1970 die bionische Forschungslandschaft (BMBW 1970).

1.3 Aktuelle Entwicklungen und neue Bionik

Seit etwa 1980 wird, ausgelöst durch die zunehmenden Möglichkeiten der Modellierung und Simulation, der Visualisierung, der messtechnischen Erfassung und der Erzeugung immer kleinerer Strukturen die Bionik auch auf die Mikroskala und später dann auf die Nanoskala erweitert. Dadurch ist die Bionik prinzipiell in der Lage, Eigenschaften biologischer Systeme auf sämtlichen Größenskalen von makroskopischen Organismen bis hin zu molekularen Vorgängen zu studieren und technisch zu bewerten. Nanotechnologie (TAB 2003), Mechatronik (elektronische Steuerung mechanischer Funktionalitäten)

und Biotechnologie werden in der bionischen Forschung seitdem verstärkt herangezogen.

Zunächst sind damit besonders Werkstoffe und Oberflächen in das Interesse der Bionik gerückt. Ein erstes wichtiges Ergebnis waren Erkenntnisse über Oberflächenstrukturen rezenter und fossiler Haiarten, deren technische Nutzung in nach ihrem Vorbild entwickelten „Ribletfolien“ zu Antihafteffekten und Widerstandsminderungen von bis zu 10 Prozent führte. Zweimal wurde der Deutsche Umweltpreis für bionische Entwicklungsergebnisse im Bereich Werkstoffe verliehen (DBU 2005): zu selbstreinigenden Oberflächen nach dem Vorbild des Lotus-Effekts (1999) und zur Festigkeitsoptimierung von Bauteilen nach dem Vorbild von Bäumen (2003). Insbesondere die seit 1989 durchgeführten Arbeiten zum Lotus-Effekt, die auf selbstreinigenden superhydrophoben und hoch strukturierten Oberflächen nach dem Vorbild der Blätter der Lotuspflanze beruhen (Neinhuis/Barthlott 1997), gewannen hohe Aufmerksamkeit.

Im Zuge der Miniaturisierung hat sich an der Schnittstelle zwischen Bio- und Nanotechnologie mit der Nanobiotecnologie eine neue Schlüsseltechnologie herausgebildet (VDI 2002). Sie beansprucht, auf der molekularen Ebene eine Brücke zwischen der unbelebten und der belebten Natur zu ermöglichen. Biologische Funktionseinheiten in grundlegender – d. h. letztlich molekularer – Hinsicht sollen erforscht werden, um auf dieser Basis funktionale Bausteine im nanoskaligen Maßstab unter Einbeziehung technischer Materialien, Schnittstellen und Grenzflächen kontrolliert zu erzeugen. Mit dem Aufkommen dieser so genannten „neuen Bionik“ (Lu 2004) im Kontext der konvergierenden Technologien („Converging Technologies“, vgl. Roco/Bainbridge 2002), zu denen neben Bio- und Nanotechnologie auch Informatik und Kognitionswissenschaften, gehören, ergeben sich neue Erkenntnismöglichkeiten und technische Zugänge der Bionik – allerdings auch neue Probleme ihrer „Identität“ (IÖW/GL 2005; vgl. dazu Kap. V.1).

2. Zur Definition der Bionik

Definitionen sind Festlegungen von Begriffen zur Realisierung von bestimmten Unterscheidungsabsichten. Definitionen sind weder wahr noch falsch, sondern mehr oder weniger zweckmäßig. Unter dieser Prämisse geht es im Folgenden darum, die Unterscheidungsabsichten in den gängigen Definitionen herauszuarbeiten, um auf dieser Basis sowohl einen anschaulichen und expliziten Eindruck davon zu erreichen, was Bionik sein will und soll, als auch eine für diese Studie brauchbare pragmatische Arbeitsdefinition der Bionik zu bestimmen.

2.1 Beispiele vorliegender Definitionen

Der Begriff „Bionik“ wurde erstmals von J. E. Steele 1958 verwandt. Im Frühjahr 1959 wurde von ihm an der Wright Patterson Airforce Base ein Projekt zur Erforschung der Arbeitsweise des menschlichen Gehirns unter der Kurzbezeichnung „Bionics“ begonnen. Der offizielle Startpunkt für die Bionik im heutigen Verständnis wird in

der Regel mit einem Seminar unter dem Leitthema „Living prototypes – the key to new technology“ im September 1960 in Dayton, Ohio, verbunden, auf dem Steele den Begriff zum ersten Mal in der Öffentlichkeit benutzte (Bionics Symposium 1960; BMBW 1970).

Was unter Bionik genau zu verstehen ist, was zur Bionik gehört und was nicht, ist nicht unumstritten. Bionik ist, wie bereits die kurze geschichtliche Einführung gezeigt hat, aus verschiedenen Quellen entstanden. Heute bestehen Bedeutungsunterschiede zwischen den Sprachräumen – z. B. zwischen „Bionik“ und „bionics“ –, und es gibt konkurrierende oder zumindest parallel verwendete Begriffe wie „Biomimetik“ oder „biomimicry“. Einen Überblick über verschiedene Definitionen und Erklärungen der Bionik im deutschsprachigen Raum gibt Tabelle 1. Diese Definitionen bilden den Ausgangspunkt für die nähere Begriffsbestimmung in Kapitel II.2.2.

Zuvor sei ein Blick auf den englischen Sprachraum geworfen. Der Begriff „bionics“ wird dort stark mit der Mensch-Maschine-Schnittstelle und der Prothetik verbunden – Themenfelder, die hingegen im deutschsprachi-

gen Raum aus der Bionik weitgehend ausgeschlossen wurden. „Bionics“ bezeichnet im englischen Sprachraum denjenigen Bereich, der sich im weitesten Sinne mit künstlichen Organen, insbesondere auf der Basis von Computertechnik und Robotik beschäftigt (IÖW/GL 2005). Die Zeitschrift „Applied Bionics and Biomechanics“ definiert demgemäß „bionics“ folgendermaßen: „Application of biological principles and living organisms' structure and functions, to the study and design of engineering systems, especially electronic systems“. Der Begriff „Biomimetik“ (biomimetics) fungiert teilweise als Oberbegriff für technische Lösungen nach dem Vorbild der Natur, einschließlich der Prothetik. Daneben gibt es noch eine Vielzahl weiterer Begriffe für bionische Ansätze wie z. B. „biomimicry“ oder „bio-inspired“. Die Onlinezeitschrift „Bioinspiration & Biomimetics“ umschreibt ihr Themenfeld als „research involving the study and distillation of principles and functions found in biological systems that have been developed through evolution, and application of this knowledge to produce novel and exciting basic technologies and new approaches to solving scientific problems“ (IÖW/GL 2005).

Tabelle 1

Deutschsprachige Definitionen der Bionik

Urheber	Definition	Quelle
J. E. Steele	Die Bionik entwickelt Systeme, deren Funktion natürlichen Systemen nachgebildet ist, die natürlichen Systemen in charakteristischen Eigenschaften gleichen oder ihnen analog sind (1960).	BMBW 1970
L. P. Krajzmer	Bionik ist die Wissenschaft, die biologische Prozesse und Methoden mit dem Ziel untersucht, die sich ergebenden Erkenntnisse bei der Vervollkommnung alter und der Schaffung neuer Maschinen und Systeme anzuwenden	Krajzmer 1967
H. E. von Gierke	Bionik ist angewandte Biologie	BMBW 1970
BMBF	Anwendung der Kenntnis von Funktion und Struktur lebender Organismen zur Entwicklung oder Optimierung technischer Systeme	BMBW 1970
H. Marko	Lernen von der belebten Natur zwecks Anwendung in der Technik	Marko 1972
L. Gérardien	Bionik ist die Kunst, technische Probleme durch Kenntnis natürlicher Systeme zu lösen.	BMBW 1970
Neumann et al. (VDI)	Bionik als Wissenschaftsdisziplin befasst sich systematisch mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme	Neumann 1993
Hauschildt	Bionik ist eine Kreativitätstechnik, die die Ideenfindung für neue Produkte und Prozesse zum Ziel hat	Hauschildt 1997
Biomimetik	Biomimetik ist die Umsetzung der Erkenntnisse aus der biologischen Forschung in technische Anwendungen	Speck 1999
Nachtigall	Die Definition von Neumann et al. ergänzt um: Dazu gehören auch Aspekte des Zusammenwirkens belebter und unbelebter Teile und Systeme sowie die wirtschaftlich-technische Anwendung von Organisationskriterien. Bionik betreiben bedeutet Lernen von den Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien der Natur für eine positivere Vernetzung von Mensch, Umwelt und Technik	Nachtigall 2002
BIOKON e.V.	Entschlüsselung von „Erfindungen der belebten Natur“ und ihre innovative Umsetzung in die Technik	Biokon 2005a

2.2 Differenzierungen und Definitionsmerkmale

Das Ziel der Bionik, und hierin stimmen die Definitionen weitgehend überein, ist die Entwicklung von innovativen technischen Produkten, Prozessen oder Systemen bzw. die Erbringung von Beiträgen hierzu. Sie ist damit Teil eines breit verstandenen Innovationsprozesses (Pflaum 2002) und keine Naturwissenschaftsdisziplin wie Physik oder Biologie, denn ihr letztendliches Ziel ist nicht die Gewinnung von Erkenntnissen, sondern die Erfindung und Entwicklung technischer Produkte oder Prozesse und daran anknüpfender soziotechnischer Systeme. Die Forschung zum Wissenserwerb (Auswahl eines geeigneten biologischen Vorbildes, Beobachtung und Analyse, Identifikation funktionaler Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen, Modellbildung) stellt nur den ersten Schritt des bionischen Innovationsprozesses dar, der letztendlich die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines neuen technischen Produktes oder Prozesses zum Ziel hat – auch wenn er dieses Ziel, wie alle auf Innovation zielende Entwicklung, nur zu einem Teil erreicht. Auf rein biologische Erkenntnisse zielende Arbeiten, wie es z. B. in der Technischen Biologie oft der Fall ist, gehören damit noch nicht zur Bionik (Nachtigall 2002, S. 7).

Weiterhin stellt Bionik aber auch keine der etablierten Teildisziplinen der Technik- oder Ingenieurwissenschaften wie Maschinenbau oder Verfahrenstechnik dar. In den ingenieurwissenschaftlichen Fächern werden gelegentlich bionische Lösungen oder Ideen verwendet, neben anderen, nicht bionischen Lösungsstrategien. Bionik steht damit quer zu den üblichen Einteilungen der Ingenieurwissenschaften, wie sie etwa an den Technischen Universitäten etabliert sind, auch wenn sie über ihre Zielbestimmung zu den Ingenieurwissenschaften zu zählen ist.

Gemeinsam ist allen Definitionen, dass das im bionischen Innovationsprozess zum Einsatz kommende Wissen aus der Beobachtung und Erforschung der belebten Natur stammt (z. B. Funktionswissen über biologische Prozesse). Die meisten Definitionen identifizieren als Kern des bionischen Gedankenganges, dass Wissen aus dem Studium des biologischen Vorbildes als Basis für die Übertragung auf technische Lösungen dient. Das biologische Vorbild stellt in diesem Zusammenhang einen „living prototype“ dar, in dem die technisch zu entwickelnden funktionalen Zusammenhänge bereits realisiert sind – so lässt sich die Vorsilbe „Bio“ in Bionik erläutern.

Dabei geht es in der Bionik nicht um die Nutzung der lebenden Systeme selbst oder die Nutzung biologischen Materials. Während z. B. Biotechnologie definiert ist als „die technische Nutzung von Organismen und ihrer Funktionseinheiten“ (bis in den molekularen Bereich, vgl. OECD 1989) geht es in der Bionik um die Nutzung von Wissen aus lebenden Systemen (z. B. Funktionswissen) in technischen Kontexten, womit in der Regel keine Nutzung der entsprechenden Organismen verbunden ist. So wird z. B. in wasserabweisenden Schutzanstrichen auf der Basis des Lotus-Effekts das mikroskopische Wissen hierüber genutzt, es werden aber den Schutzanstrichen keine Extrakte aus Lotuspflanzen beigelegt.

Interessant und widersprüchlich zugleich ist, ob Nachbildungen lebender Systeme oder ihrer Teile – und damit auch Prothesen – zur Bionik gerechnet werden. Die ursprüngliche Definition von J. E. Steele, der immer wieder als Urheber des Begriffs „Bionics“ genannt wird, schließt genau diese Nachbildung ein, während die meisten Bioniker in Deutschland die Prothetik nicht als Teilgebiet der Bionik anerkennen würden. Die damit eng verbundene Frage, ob der Bereich biologisch-technischer Interaktion bzw. Schnittstellen (Bioelektronik oder Biomikromechanik), der sich direkt mit der Verknüpfung biologischer und technischer Strukturen auf der Mikroebene beschäftigt, zur Bionik gehört oder nicht, bleibt kontrovers.

2.3 Die normative und die emotionale Seite der Bionik

Zur Bionik gehört nach Meinung vieler ihrer Vertreter ihr Leitbildcharakter der Naturnähe oder Naturgemäßheit (dieser Abschnitt basiert überwiegend auf dem Gutachten IÖW/GL 2005). Während Technik und Natur oft als Gegensätze betrachtet werden, sehen viele die Bionik als eine Technik nach dem Vorbild der Natur, die damit ein Stück weit eine Versöhnung dieser Gegensätze auf einem hohen wissenschaftlich-technischen Niveau verspricht. Ohne Bezugnahme auf dieses Versprechen könne Bionik (nach IÖW/GL 2005, S. 99) sogar nicht angemessen definiert werden. Dieses normative Leitbild gehört danach zur Forschungsrealität der Bionik, indem es die Forschungsrichtungen der Akteure orientiert und diese entsprechend motiviert.

Ohne Zweifel ist dieses „Versprechen“ der Bionik für viele Akteure eine wesentliche Motivation ihres wissenschaftlichen Engagements. Die Berechtigung dieses Versprechens der Bionik bedarf aber der kritischen Überprüfung. Ein erster Schritt besteht darin, den möglichen „rationalen Kern“ dieses Versprechens kritisch heraus zu arbeiten (Kap. II.3). Nur auf diese Weise kann sich zeigen, was in der Bionik als Leitbild für innovative Problemlösungen Bestand hat und was möglicherweise eine eher naturromantische Wunschvorstellung ist. Auf der anderen Seite sind bionische Lösungen genauso wie andere technische Lösungen einem Technikbewertungsprozess zu unterziehen, in dem geklärt werden muss, welche Chancen und Risiken im Einzelfall zu bedenken sind. Denn eine Einlösung dieses Versprechens ist nicht garantiert; dies kann nur im Einzelfall geklärt werden.

Im Selbstverständnis von Teilen der Community handelt es sich bei der Bionik darüber hinaus auch um ein emotionales Projekt. In bionischen Problemlösungen könne danach die Faszination an der Natur mit der Faszination an Hochtechnologie verbunden werden. Dabei spiele das Staunen über „technische Hochleistungen“ von Organismen, über die unendlich erscheinende Vielfalt in der Natur und über die Originalität bzw. Genialität sowie die „Eleganz“ vieler Lösungen eine wichtige Rolle.

Bionische Lösungen faszinieren vielfach auch Menschen, die sich ansonsten nicht unbedingt als „technikbegeistert“ bezeichnen würden. Die Bionik verspricht „angepasste“, robuste, risikoärmere und ökologisch verträgliche Lösun-

gen für gesellschaftliche Probleme (Nachtigall 2002). Hoffnungen auf grundsätzlich „alternative Technologien“ spielen hier eine Rolle. Bionik wird damit auf der Ebene gesellschaftlicher Werte in unmittelbarem Zusammenhang zu Leitbildern wie Kreislaufwirtschaft, nachhaltige Chemie, biologische Landwirtschaft oder alternative Medizin gesehen. „The manner in which bionics will mark its greatest contribution to technology is not through the solution of specific problems or the design of particular devices. Rather it is through the revolutionary impact of a whole new set of concepts, a fresh point of view“ (Steele in (BMBW 1970)).

In diesem Sinne ist auch der überwiegende Teil der Berichterstattung in Massenmedien zur Bionik sehr positiv. Titel wie „BIOKON – High-Tech-Lösungen aus der Natur“ (Deutschlandradio 2005), „Natur nachgebaut“ (Wissenschaft-aktuell 2005a), „Naturpatent Klettverschluss“ (Geoscience-online 2002), „Natur als Patentamt für Erfindungen“ (Presstext 2000), „Bionik im Auto – von der Natur lernen“ (Süddeutsche Zeitung 2005) und „Technik aus Natur“ (Andres 2005) zeigen, dass gerade der Rückgriff auf das Vorbild Natur für die Medienberichterstattung von besonderem Interesse ist (UMSICHT 2005, S. 70).

2.4 Das Bionik-Verständnis in dieser Studie

Aufbauend auf der kritischen Diskussion vorhandener Definitionen der Bionik werden in dieser Studie unter bionischen Erkenntnis- und Innovationsprozessen wissenschaftlich gestützte Anstrengungen verstanden und zwar in der Kombination von drei Schritten, die

- ein technisches Erkenntnis- und Gestaltungsinteresse verfolgen und damit auf der Suche nach Problemlösungen, Erfindungen und Innovationen sind;
- dabei zur Realisierung dieses Erkenntnisinteresses gezielt Wissen aus der Beobachtung und Analyse lebender Systeme und ihrer funktionalen Einheiten gewinnen und
- dieses Wissen über Strukturen, Prozesse und Eigenschaften lebender Systeme auf technische Systeme übertragen.

Bionik ist auf die Interaktion zwischen biologischem und technischem Wissen mit klarer Anwendungsorientierung angewiesen. Sie liefert Ausgangspunkte für neuartige Mittel-Zweck-Kombinationen und damit für Innovationen. Dies bedeutet, dass sich Bionik letztlich daran messen lassen muss, welchen Beitrag sie im Innovationsprozess leisten kann (UMSICHT 2005, S. 31). Die Art und Weise, zu bionischen Ideen und Realisierungen zu gelangen, beruht vor allem auf dem Informationstransfer zwischen Biologie und Technik. Gelingende Übertragung von Wissen über Strukturen, Prozesse und Eigenschaften lebender Systeme auf technische Systeme bedarf der verständlichen Kommunikation, Korrespondenz und Transparenz zwischen den Disziplinen.

Die Ebene, auf der die Übertragung des Wissens erfolgt, kann dabei stark variieren, von makroskopischen Eigen-

schaften von Organismen oder Ökosystemen bis hin zu molekularen Vorgängen im subzellularen Bereich. Teils handelt es sich um eine Übertragung abstrahierten Prozess- oder Strukturwissens über Lebewesen auf technische Systeme (wie im Lotus-Effekt), teils um technischen „Nachbau“ lebender Vorbilder oder ihrer Teile (wie z. B. in der Prothetik, vgl. Kap. V.2). Entscheidend ist das technische Problemlösungsinteresse in Kombination mit der Heranziehung von Wissen über Funktionsprinzipien und Eigenschaften lebender Systeme. Hier liegt der definitivische Kern der Bionik.

Damit enthält die in dieser Studie zugrunde gelegte Definition keine wertende Zielbestimmung, etwa in der Art, Bionik „als Versprechen“ anzusehen (IÖW/GL 2005) oder davon per se eine natürlichere oder naturnähere Technik zu erwarten (Nachtigall 2002). Unstrittig spielen diese normativen Motivationen und Erwartungen in Geschichte und Gegenwart der Bionik eine große Rolle; als Definitionsmerkmal erscheinen sie jedoch ungeeignet. Denn vor allem würde eine solche wertende Definition sicher nicht in der ganzen Community geteilt und sind auch in den gängigen Begriffsbestimmungen (Tab. 1) in der Minderzahl. Mit der werthaltigen Definition würde man Entwicklungen ausschließen, die zwar den spezifisch bionischen Schritt des Wissenstransfers aus lebenden in technische Systeme nutzen, die aber gar nicht jene Werthaltungen und substanziellen Zielsetzungen teilen. Eine gemeinsame normative Grundeinstellung muss aus der Community selbst kommen; dies ist jedoch zurzeit nicht erkennbar.³

Auch enthält jede neue Entwicklungslinie ein „Versprechen“, das auf positive Folgen und Eigenschaften der daraus sich ergebenden Produkte setzt. Trotzdem können diese Versprechen nicht Teil der Definition sein, denn ob diese Versprechen sich erfüllen lassen, kann erst die weitere Entwicklung zeigen. Formulierungen des Typs: „Bionik betreiben bedeutet Lernen von den Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien der Natur für eine positivere Vernetzung von Mensch, Umwelt und Technik“ (Nachtigall 2002) würden implizieren, dass die „positivere Vernetzung“ auch wirklich eintritt, damit man von Bionik sprechen dürfte. Dass viele mit der Bionik ein „Versprechen“ verbinden, ist legitim, trägt aber nicht zu einer angemessenen Definition bei.

Das beschriebene Verständnis der Bionik lässt sowohl technologiegetriebene (technology push) als auch problemorientierte (demand-pull) Ansätze zu. Einerseits können aus dem Studium natürlicher Systeme unter dem „technischen“ Blick Ideen für innovative Produkte generiert werden. (Der Lotus-Effekt ist auf diese Weise zu einer Produktidee zur Herstellung von wasserabweisender Farbe genutzt worden.) Andererseits können vorhandene Aufgaben und Probleme gezielt auf bionische Weise angegangen werden. Bionik stellt sich damit als spezifische und systematische Suche nach technischen Problemlösungen unter Nutzung von Wissenstransfers aus der Er-

³ So besteht zu dieser Frage auch zwischen den beiden für diese Studie in Auftrag gegebenen Gutachten keine Übereinstimmung.

forschung lebender Systeme dar. Bionik trägt zur (be- trächtlichen) Vermehrung des Ideenpools für technische Problemlösungen auf ganz verschiedenen Ebenen bei, aus den Beständen der Problemlösungen, die im Laufe der Evolution in der Natur entstanden sind. Ob diese bioni- schen Ideen zu Produkten führen, Märkte erobern und die damit verbundenen Erwartungen erfüllen, hängt von einer Vielzahl von Faktoren auch außerhalb der Bionik ab.

3. Das Verhältnis von Natur und Technik in der Bionik

Bionik enthält nach dem Gesagten zwei verschiedene Einstellungen zur Natur: einerseits den „technischen Blick“ auf die Natur verbunden mit einem instrumentel- len Erkenntnisinteresse, aus diesem „technischen Blick“ etwas zu lernen für technische Problemlösungen; andererseits das Versprechen, bestimmte Konflikte zwischen Na- tur und Technik aufzulösen durch, metaphorisch gespro- chen, einen Blick auf die Technik durch die „Augen der Natur“. Dieses Doppelverhältnis soll im Folgenden näher untersucht werden. Ausgangspunkt ist die Bionik „als Versprechen“, von wo aus dann kritisch die für das Ver- ständnis der Bionik zentrale „Nachahmungsthese“ zu un- tersuchen sein wird (IÖW/GL 2005).

3.1 Bionik als Lernen von der Natur

Zur Bionik gehört, und hierin stimmen alle Definitionen überein, von „der Natur“ zu lernen. Es geht darum, im Zuge der Evolution entstandene Prozesse und Strukturen als Möglichkeiten zur Lösung bestimmter Anforderungen in der belebten Natur zu erkennen, aus dem natürlichen Zusammenhang in Form von Prozess- oder Strukturwis- sen zu abstrahieren und als technische Lösungsideen zur Bewältigung von Problemen einzusetzen. Dieses Lernen kann in zunehmender Abstraktion unterschieden werden nach: Lernen (1) von den Ergebnissen, (2) von den evolu- tionären Verfahren und Optimierungsstrategien sowie (3) von den Erfolgsprinzipien der Evolution.

(1) Lernen von den heute vorliegenden Ergebnissen und Produkten der Evolution: Diese wohl älteste Form des Lernens von der Natur führte zu wichtigen bionischen Lösungen, wie z. B. der Klettverschluss, der Fallschirm und das Auftrieb gebenden Flügelprofil (Lilienthal). Vor Beginn der wissenschaftlichen Biologie spielte die unmit-

telbare Naturbeobachtung hier die zentrale Rolle. Heute erweitern Morphologie, Histologie, Funktionsbiologie, Verhaltensforschung und Ökologie sowie technische Bio- logie mit technischen Mitteln (Mikroskopie, hoch auf- lösende Kameras, Sender, satellitengestützte Beobach- tung) dieses Spektrum ganz erheblich. In Erklärungen und Modellierungen, wie Organismen bestimmte Lei- stungen vollbringen, kommt das gesamte Methodenarsenal der Biologie und angrenzender Disziplinen zum Einsatz. Bionisch motivierte Forschung in diesem Feld reicht vom „klassischen“ Studium der Fortbewegung von Organis- men in den Umweltmedien bis zu Sinnesphysiologie und Biokybernetik.

(2) Lernen von den evolutionären Verfahren, Funktio- nen und Strukturen: Während im Lernen von den Ergeb- nissen der Evolution die Frage im Zentrum stand, auf welche Weise die Organismen ihre Leistungen vollbrin- gen, geht es nun darum , wie sie diese Strukturen und Leistungen entwickeln können bzw. konnten. Damit ste- hen der entwicklungsbiologische und der evolutionsbio- logische Zugang im Mittelpunkt. Die Aufklärung funda- mentaler biologischer Steuerungsprozesse ermöglicht z. B. zunehmend den synthetischen „Nachbau“ von Mus- schelschalen, Knochen oder Sinnesorganen.

(3) Lernen von ökologischen bzw. evolutionären Er- folgsprinzipien: Auf dieser Ebene stellt sich die Frage, in- wie weit es möglich ist, aus der Analyse der Evolution von Organismen und Ökosystemen allgemeine Funk- tionsprinzipien abzuleiten, die auch Leitfunktion bei der Gestaltung technischer Systeme haben können. Als Merkmale evolutionär erfolgreicher Systeme gelten vor allem die Robustheit biologischer Strukturen, die Resi- lienz von Ökosystemen und die Adaptivität bzw. Flexi- bilität evolutionärer Prozesse angesichts sich dynamisch verändernder Umgebungsbedingungen (vgl. dazu Kap. II.3.2). Auf der Ebene von Ökosystemen bzw. des gesam- ten Evolutionsprozesses bekommt die Bionik dazu wesentliche Impulse aus der Verhaltensforschung, der Ökosystemtheorie, der Evolutionstheorie und aus entspre- chenden Möglichkeiten zur Mathematisierung und Model- lierung. Bekannte Beispiele sind das evolutionäre Pro- grammieren und Optimieren (Kap. V.3, vgl. Rechenberg 1978; Schwefel 1981) sowie in jüngerer Zeit die „Schwarmintelligenz“ (Tab. 2).

Tabelle 2

Von der Biologie zur Technik am Beispiel der Schwarmintelligenz

Biologie	Übertragung in die Technik, z. B.
energieeffizienter Verbandsflug von Gänsen und Schwänen	energiesparendem Formationsflug von Flugzeugen
koordinierte Vorgänge beim Nestbau von Wespen	Kontrolle autonom steuerbarer Satelliten, die sich in Umlaufbahnen zu Gruppen ordnen
koordinierte Transporte von Nahrungsteilen, die für einzelne Individuen zu schwer sind	wirksame Algorithmen für die Steuerung von Robotern

Quelle: UMSICHT 2005 nach Küppers 2001, geändert

3.2 Prinzipien der evolutionären Optimierung

Die bereits erwähnte Überzeugung vieler Bioniker, dass durch bionische Ansätze eine natürlichere, naturnähere oder besser angepasste Technik realisiert werden könne, beruht vor allem auf dem Argument, dass die übertragene Lösungen in der belebten Natur im Laufe der Evolution entwickelt und „optimiert“ worden seien. Bereits aus diesem Grund könne man bessere Eigenschaften wie Einpassung in die natürlichen Kreisläufe, Risikoarmut, Fehlertoleranz und Umweltverträglichkeit erwarten, auch wenn diese nicht garantiert seien. Danach sei Anliegen der Bionik, technisch die Lösungen zu nutzen, die die Natur in Jahrtausenden optimiert habe. Die Natur habe „Millionen Jahre Entwicklungsvorsprung“ (Nachtigall 2002). Die Frage im Folgenden ist, aus welchen Prinzipien der evolutionären Optimierung etwas für die Technik gelernt werden kann. Hierfür werden folgende Prinzipien der Evolution angeführt (nach IÖW/GL 2005, S. 27 f.):

– Mehrdimensionale Optimierung:

Evolutionsprozesse können in der Regel als mehrdimensionale Optimierungsprozesse begriffen werden, die sich – dies unterscheidet sie von den meisten technischen Optimierungen – in einer dynamisch wandelnden Umgebung vollziehen. Deswegen sind die Ergebnisse der evolutionären mehrdimensionalen Optimierung nicht nur besonders angepasst, sondern zudem robust gegenüber sich verändernden Umgebungsbedingungen. So wird in der Bionik häufig versucht, gegenläufige Prinzipien zu vereinen.⁴

– Diversität und Selbstorganisation:

Selbstorganisation senkt auf der molekularen (biochemischen) Ebene den Energie- und Stoffaufwand. Biochemische Syntheseprozesse setzen im Unterschied zu den meisten Synthesen in der Industriellen Chemie nicht auf hohe Temperaturen, hohe Drücke und hochreine Chemikalien. Enzyme sorgen dafür, dass die Umsetzungsreaktionen unter physiologischen Bedingungen erfolgen und mit wenig „Nebenreaktionen“ verbunden sind. Selbstorganisationsprozesse vermin-

⁴ Ein Beispiel ist die Entwicklung von selbst schärfenden Schneidwerkzeugen: Zum einen soll der Materialverschleiß minimiert (eine Zielsetzung aus der klassischen Werkstoffkunde) und auf der anderen Seite „Verschleiß produziert werden“, um die ständige Schärfe der Schneidwerkzeuge zu garantieren. Der bionische Ansatzpunkt kommt von Nagetierzähnen (z. B. Ratten). Dort ist lediglich die Vorderseite der Schneidezähne mit einem hufeisenförmigen, sehr dünnen und harten Zahnschmelz überzogen. Dahinter sitzt das weichere Zahnbein. Dieses, den Zahn mechanisch stabilisierende Dentin, wird beim Nagen bevorzugt abgerieben, wodurch eine stets messerscharfe Schmelzkante hervorsteht (UMSICHT 2005). Die entwickelten Schneidmesser besitzen einen Grundkörper aus Hartmetall (Legierung aus Wolframcarbid und Kobalt), wobei die Außenseite der gewölbten Klinge zudem mit einer mehrlagigen Keramikschicht aus verstärktem Titanitrid bedeckt ist. Ergebnis sind extrem standfeste Schneidmesser, die nicht stumpf werden. Anders als die ständig nachwachsenden Nagerzähne, schrumpfen die selbst schärfenden Klingen allerdings mit der Zeit. Sie müssen aber erst dann ausgewechselt werden, wenn die Messer verbraucht sind. Ständiges Ein- und Ausbauen sowie Nachschärfen entfällt damit.

dern zudem den Bedarf an Kontrolle und Steuerung und zwar auf allen Ebenen der technischen Entwicklung.

– Fließgleichgewicht und Resilienz:

Die biologischen bzw. ökosystemaren Vorstellungen von „Stabilität“ unterscheiden sich signifikant von den mehr oder minder „mechanischen“ Stabilitätsvorstellungen in der Technikentwicklung. Die Systeme haben eine hohe „Pufferkapazität“, mit deren Hilfe Veränderungen in den Rahmenbedingungen kompensiert werden können (sog. Resilienz; vgl. Holling 1973). Die Art und Weise, wie Resilienz als biologische bzw. ökosystemare Form von Stabilität zustande kommt, verdient Aufmerksamkeit auch in Bezug auf technische Systeme.

– Ressourceneffizienz:

Das Wachstum und Wohlergehen von Organismen und Populationen wird durch „limitierende Faktoren“ (Odum 1983, S. 167 ff.) wie z. B. das Angebot von Licht, Wasser, Nährstoffe und Lebensraum begrenzt. Organismen müssen mit dem zurecht kommen, was sie vorfinden (Opportunismusprinzip). Diejenigen Populationen, die in der Lage sind, mit knappen Ressourcen besonders effizient umzugehen, haben Vorteile. Daher gibt es in der Natur erstaunliche Beispiele für einen besonders effizienten Umgang mit knappen Ressourcen und damit mögliche Vorbilder für Nachhaltigkeit in ressourcenökonomischer Hinsicht.

– Modularität:

Modulare Elemente lassen sich auf verschiedenen Ebenen „natürlicher Systeme“ entdecken. Organismen sind z. B. aus Zellen und Zellen wiederum aus Organellen aufgebaut. Das „Modul“ Zelle mit einer gemeinsamen Grundausstattung und zusätzlich einem Potenzial zur Differenzierung ist ein Erfolgsmodell der Evolution. Bottom-up-Modularität – im Gegensatz zu der verbreiteten Top-Down-Modularität in technischen Systemen – ist ein Kennzeichen der Evolution.

Aus den genannten Gründen könnte aus der Natur gelernt werden, mit begrenzten Ressourcen, abfallarmen Produktionsprozessen und milden Milieubedingungen komplexe Strukturen und hohe Funktionalität zu erreichen. Dadurch, dass biologische Systeme auf Redundanz und Vielfalt aufgebaut sind, besitzen sie darüber hinaus eine immanente Fehlerfreundlichkeit (von Weizsäcker/von Weizsäcker 1984, nach UMSICHT 2005). Diese Prinzipien können in bestimmten Hinsichten Vorbildcharakter für die Gestaltung des technischen Fortschritts haben, z. B. im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft oder auf die „Konsistenz“ technisch induzierter Stoffströme mit natürlichen Stoffströmen (Huber 1995). Dabei geht es weniger um ein „direktes“ Lernen von natürlichen Organismen oder Ökosystemen, sondern um ein Lernen auf der Ebene abstrakter Prinzipien.

3.3 Bionik als Nachahmung der Natur?

Die Nachahmungsthese steht im Zentrum vieler Einschätzungen der Bionik, wenn es um ihre „emotionale“ Seite geht. Wegen der Erprobtheit der natürlichen Lösungen in der Evolution sei zu erwarten, dass eine Technik nach dem Vorbild der Natur eine „natürlichere“ Technik und deswegen auch risikoärmer und angepasster sei.

Dabei wird gelegentlich die Natur als „Entwickler“ oder „Erfinder“ personalisiert, so z. B. in der Definition der Bionik des BIONIKON-Netzwerks (s. Tab. 1). Eine derartige Personalisierung wird jedoch intern auch kritisiert. Insbesondere der Begriff „Erfindungen der belebten Natur“ begünstigt negative Einschätzungen der Patentfähigkeit bionischer Entwicklungen – die heute allgemein nicht mehr infrage gestellt wird. Unabhängig von diesem teils problematischen Sprachgebrauch ist zu fragen, ob und inwieweit die Bionik eine Nachahmung der Natur (Mimesis) verfolgt bzw. verfolgen soll. Hierzu ist als erstes die Metapher der „Optimierung“ natürlicher Strukturen und Prozesse durch die Evolution zu untersuchen.

Die gesamte Bionik durchziehen Überzeugungen, dass in der Natur Strukturen und Prozesse über Jahrmillionen optimiert worden seien (Nachtigall 2002) und deswegen unseren Erfahrungsschatz in einer Weise bereichern, wie wir es in Labor und Realität niemals selbst erreichen könnten. So ist es z. B. prinzipiell nur sehr begrenzt möglich, Langzeitexperimente im Labor „im Zeitraffer“ durchzuführen, was z. B. in der Diskussion zu Freisetzung gentechnischer Organismen immer wieder als kritisches Argument vorgebracht wird. Wäre es z. B. möglich, als Ersatz für solche Langzeitexperimente auf die Erfahrungen der Optimierung in der natürlichen Evolution zu hoffen?

An dieser Stelle ist an zwei Aspekte von „Evolution“ und „Optimierung“ zu erinnern. Erstens ist die Evolution „zukunftsblind“ – sie operiert nicht mit Zielsetzungen, auf die hin optimiert wird, sondern geht vom Bestehenden und dessen allmählicher Weiterentwicklung aus, nicht wissend, ob diese Weiterentwicklung auf lange Sicht dem Erhalt der Art oder der Stabilisierung des Ökosystems nützt oder es gerade zugrunde richtet und dem Aussterben aussetzt. Dieser Aspekt ergebnisoffener Evolution darf nicht den Blick darauf verdecken, dass wir in Bezug auf Technikentwicklung eine derartige Zukunftsblindheit gerade nicht wünschen.

Zweitens ist der Begriff „Optimierung“ ein relativer Begriff. Optimal wird nicht „an sich“, sondern immer für bestimmte Situationen, für bestimmte Kriterien, unter bestimmten Anforderungen. Die evolutionäre Optimierung hat dementsprechend jeweils unter bestimmten (sich teilweise verändernden) Randbedingungen stattgefunden. Man kann damit nicht von natürlichen Strukturen, Funktionen oder Prozessen „an sich“ optimal sprechen, sondern nur als optimal vor dem Hintergrund der entsprechenden Anforderungen, Umgebungsbedingungen und Konkurrenzverhältnisse.

Nun wird in der Bionik ein Transfer von Lösungsideen aus evolutionär bestimmten Kontexten in gesellschaftli-

che Kontexte vorgenommen. Dort gelten aber häufig ganz andere Optimierungsbedingungen und Anforderungen:

- Evolutionär optimierte Prozesse oder Strukturen können daher im gesellschaftlichen Umfeld schlecht geeignet, wenig funktional oder gar ganz sinnlos sein. Das Prinzip des Vogelflugs beispielsweise gilt zwar allgemein als frühes Beispiel bionischer Überlegungen; die heutige Realisierung des menschlichen Traums vom Fliegen folgt jedoch teils anderen Prinzipien.
- Evolutionär optimierte Prozesse oder Strukturen können im gesellschaftlichen Umfeld unter den dort geltenden Bedingungen Risiken und Nebenfolgen produzieren, die sie im evolutionären Kontext nicht hatten. Ein hypothetisches Beispiel: Aus der Nichttoxizität der Lotuspflanze folgt nicht automatisch die Unbedenklichkeit der auf dem Lotus-Effekt beruhenden wasserabweisenden Schutzanstriche. Hier ist vielmehr eine eigene Prüfung erforderlich.

Die Ziele der evolutionären Optimierungsprozesse müssen also keineswegs identisch sein mit den Zielen gesellschaftlicher Optimierungen. Im biologisch evolutionären Optimierungsprozess sind z. B. etwaige Verluste von Individuen von untergeordneter Bedeutung. Was zählt ist die Erhaltung der Art. Das hat selbstverständlich weit reichende Konsequenzen für die technische „Sicherheitsauslegung“ von Organismen und Ökosystemen. Auch die „Knappheiten“, auf die hin jeweils optimiert wird, können sehr unterschiedlich und jeweils sehr spezifisch sein (IÖW/GL 2005, S. 24). Daraus folgt, dass die Bionik die Natur in der Regel nicht einfach kopieren kann oder soll (die Prothetik bildet hier eine Ausnahme). Der Prozess der Gestaltung technischer Systeme bleibt auch unter Berücksichtigung bionischer Ideen ein eigenständiger Prozess. Damit müssen auch die Ergebnisse bionischer Forschung und Entwicklung den Verfahren der Risikoeinschätzung und der Technikfolgenabschätzung unterzogen werden wie andere technische Entwicklungen. Die Hoffnung auf die Bionik „als Versprechen“ ergibt, auch wenn sich für dieses Versprechen einige rationale Argumente finden lassen, kein Argument für die Risikoarmut oder Verträglichkeit im Einzelfall.

Weiterhin ist danach zu fragen, ob die in der Nachahmungsthese zum Ausdruck kommende Blickrichtung dem tatsächlichen Innovationsprozess in der Bionik entspricht. Diese Blickrichtung besteht darin, in der Natur das Vorbild zu sehen, das es nachzuahmen gelte. Sicher geht es im bionischen Erkenntnisprozess darum, Wissen über Strukturen und Funktionen natürlicher Systeme zu erlangen. Dies erfolgt jedoch keineswegs einfach „durch Beobachtung“. Bereits in der frühen Bionik interessierten die betrachteten Lebewesen nicht als lebende Systeme „an sich“, sondern als Ideenlieferant für technische Lösungen. So interessierte Otto von Lilienthal nur ein ganz bestimmter Aspekt der Vögel, und zwar ein technischer Aspekt. Der „bionische Blick“ auf die Natur ist ein instrumenteller Blick und hat von sich aus zunächst keinerlei Naturschutzimplikationen.

Bei der Untersuchung natürlicher Systeme setzt Bionik damit eine „technische“ Brille der Erkenntnis auf. In die Erkennung von Funktions- und Strukturprinzipien der lebenden Natur wird bereits ein technisches Erkenntnisinteresse hineingelegt. Lebende Systeme interessieren nicht als solche, z. B. in ihrem jeweiligen ökologischen Kontext, sondern sie werden analysiert in ihrem technischen Funktionszusammenhang. Die Frage ist: Wie funktioniert das, z. B. woran liegt es, dass Vögel fliegen können oder dass Geckos glatte Wände hoch laufen können? Deutlich kann dieser „technische Blick“ der Bionik auf die Natur in der verwendeten Sprache gesehen werden: Dies ist die Sprache der Ingenieurwissenschaften, in der über lebende Systeme geredet wird. Dies hat sich in der „neuen Bionik“ auf die subzelluläre Ebene ausgeweitet, wenn dort von Rotoren und Pumpen, von Energieerzeugung und Transportsystemen gesprochen wird. Damit werden in der Bionik lebende Systeme als technische Systeme gedeutet – und dies dürfte eine wesentliche Voraussetzung dafür sein, dass die Übertragung des an lebenden Systemen gewonnenen Wissens auf technische Systeme gelingt.

So gesehen, ist Bionik erkenntnistheoretisch gebunden an eine technische Weltansicht. Sie trägt den Gedanken des Technischen in das Natürliche hinein, gewinnt aus dieser Perspektive bestimmtes Wissen, das dann wieder in die Sphäre des Technischen zurücktransferiert und dort in Problemlösungen eingebaut werden kann: „Die Bionik wählt einen technikorientierten Zugang zur Natur, um vom technisch verstandenen Leben zur lebensoptimierten Technik überzugehen“ (Schmidt 2002a, S. 141). Statt also Technik durch bionische Lösungen natürlicher zu machen, könnte man umgekehrt mit gleichem Recht davon sprechen, dass Bionik natürliche lebende Systeme technisiert, nämlich primär unter dem technischen Blickwinkel untersucht (Schmidt 2002a u. b). Die Bionik wirft einen spezifischen erkenntnistheoretischen Blick auf die Natur, indem sie sie als Ensemble technischer Problemlösungen unter evolutionärem Druck betrachtet. Das Verhältnis von Technik und Natur in der Bionik ist damit erheblich komplizierter und auch ambivalenter als es die Nachahmungstheorie nahe legt.

4. Fazit

Die Bionik stellt ein heterogenes Forschungsfeld dar, in dem mittels Wissen aus der Beobachtung und Erforschung lebender Systeme technische Problemlösungen generiert werden. Gängige Definitionen stimmen in diesen beiden Punkten überein, während weitere Definitionsaspekte umstritten sind. Dazu gehört die Zugehörigkeit der Prothetik sowie bestimmte wertende Definitionsaspekte, die eine substanzielle Zielvorgabe wie Naturangepasstheit enthalten. In dieser Studie werden unter Bionik wissenschaftlich gestützte Anstrengungen verstanden, die ein technisches Erkenntnisinteresse verfolgen. Auf der Suche nach Problemlösungen, Erfindungen und Innovationen ziehen sie zu diesem Zweck Wissen aus der Beobachtung und Analyse lebender Systeme heran und übertragen dieses Wissen über Strukturen, Prozesse und Eigenschaften lebender Systeme auf technische Systeme. Der Gedanke des Übertragens bzw. des Wissenstransfers

von lebenden auf technische Systeme ist zentral für die Bionik.

Bionik übt in der Öffentlichkeit vielfach eine Faszination aus. Lebewesen als High-Tech-Systeme zu begreifen und über ihre „technologische Leistungsfähigkeit“ zu staunen eröffnet die Möglichkeit, eine Technik zu erdenken, die gleichermaßen naturnäher oder naturgemäßer wie auch hoch innovativ ist. Diese „emotionale“ Seite der Bionik bezieht sich auf die Bionik „als Versprechen“, dass durch bionische Ansätze eine natürlichere, naturnähere oder besser angepasste Technik realisiert werden könne und damit bereits deswegen bessere Eigenschaften wie Einpassung in die natürlichen Kreisläufe, Risikoarmut, Fehlertoleranz und Umweltverträglichkeit möglich würden. Danach sei es Anliegen der Bionik, technisch die Lösungen zu nutzen, die die Natur in Jahrmillionen optimiert habe. Dadurch könnten Entwicklungsprozesse beschleunigt und Konflikte zwischen Technik und Natur entschärft werden. Diese Überzeugung stellt für viele Bioniker eine wesentliche Motivation und eine Legitimation ihrer Ansätze dar. Metaphorische Redeweisen wie „Natur als Erfinder“ oder „Optimierung der Natur“ machen ein gewisses Pathos deutlich, das jedoch intern auch kritisch gesehen wird.

Die rationale Analyse dieser Vorstellungen bezieht sich zunächst auf Eigenschaften von Problemlösungen in natürlichen lebenden Systemen, wie multikriterielle Optimierung, Nutzung des Vorhandenen, Opportunismus. Damit kann ein Potenzialcharakter bionischer Problemlösungen argumentativ abgesichert werden. Ob diese Potenziale aber auch im Einzelfall realisierbar sind und unter welchen Umständen dies gelingen kann, ist damit nicht ausgesagt. Bionische Problemlösungen sind nicht per se risikoärmer oder umweltverträglicher als traditionelle technische Lösungen. Denn eine evolutionäre Optimierung in der Natur erfolgt nach anderen Kriterien und unter anderen Bedingungen als eine technische Problemlösung. Die Übertragung des Wissens, das an lebenden Systemen gewonnen wurde, in eine technische Umgebung kann die Potenziale der Bionik zunichte machen oder sogar in Risiken transformieren. Die These von der Nachahmung der Natur in der Bionik erweist sich bei näherem Hinsehen als ambivalent.

Auf diese Weise zeigt es sich, dass das Verhältnis der Bionik zur Natur gespalten ist. Natur hat in der Bionik einerseits Vorbildcharakter, sie interessiert aber andererseits nicht als Natur, sondern eben „nur“ als Vorbild für technische Problemlösungen. Damit legt die Bionik einen technischen Blick auf Natur nahe, der einem ursprünglichen „unmittelbaren“ Blick auf die Natur als Natur entgegengesetzt ist.

III. Bionik – ein Überblick

Bionische Forschung und die Entwicklung entsprechender Produkte oder Verfahren erfolgen in ganz verschiedenen Gebieten, zu denen es keine einheitliche und anerkannte Klassifizierung gibt (Kap. III.1). In Deutschland besteht eine vielfältige und thematisch breit ausgerichtete Forschungslandschaft mit guter Infrastruktur, während

der Transfer in die industrielle Praxis teils schwierig ist (Kap. III.2). Auf der internationalen Ebene (Kap. III.3) gibt es vor allem in Großbritannien und den USA umfangreiche Aktivitäten zur Bionik; in einigen asiatischen Ländern ist Bionik stark im Kommen. Die deutsche Position stellt sich vor diesem Hintergrund weithin als ausgezeichnet dar, auch wenn einige Schwächen erkennbar sind (Kap. III.4). Dieses Kapitel beruht in den wesentlichen Grundzügen auf dem Gutachten von UMSICHT (2005), das über die hier präsentierten Ergebnisse hinaus eine Fülle von Details bereitstellt (vgl. dazu Anhang 1 bis 7).

1. Forschungs- und Anwendungsfelder

Eine übersichtliche und durchgängig akzeptierte Einteilung der Bionik in Teilgebiete, Forschungsfelder und Anwendungsbereiche ist nicht verfügbar. Die Einteilungen variieren zwischen sehr groben und ausgesprochen differenzierten Vorschlägen mit verschiedenen Graden an Überlappung (UMSICHT 2005, Kap. 6). Eine ausgesprochen karge Einteilung ist die Gliederung nach Konstruktionsbionik, Verfahrensbionik und Informationsbionik (BIOKON 2005a), während die – relativ weit verbreitete – Unterteilung nach Nachtigall (2002) viel detaillierter ist. Sie gliedert Bionik in die Forschungs-, Entwicklungs- und Anwendungsfelder

- Materialien und Strukturen,
- Formgestaltung und Design,
- Konstruktionen und Geräte,
- Bau und Klimatisierung,
- Robotik und Lokomotion,
- Sensoren und neuronale Steuerung,
- anthropo- und biomedizinische Technik,
- Verfahren und Abläufe,
- Evolution und Optimierung.

Die für diese Einteilung verwendeten Kriterien sind höchst unterschiedlicher Natur: Sie bestehen aus Orientierungen an Anwendungsfeldern wie Bauen oder Klimatechnik, an Technologiebereichen wie Sensoren oder an korrespondierenden Ingenieursdisziplinen wie Verfahrenstechnik. Teilweise kommt es zu Überlappungen der identifizierten Teilbereiche. In methodisch-logischer Hinsicht ist diese Einteilung daher – wie andere Einteilungen ebenfalls (UMSICHT 2005, S. 46) – unbefriedigend. Dies scheint dem spezifischen Umstand geschuldet zu sein, dass bionisches Denken zwar in ganz verschiedenen Anwendungsfeldern und Technikbereichen zum Tragen kommen kann, dort aber jeweils nur einen (kleinen) Teil der Gesamtaktivitäten ausmacht. Dementsprechend wird die Bionik in nationalen und internationalen Technologieanalysen nicht als eigenständiger Bereich wahrgenommen, sondern hier dominieren die klassisch geprägten, eher disziplinären Technologiefelder oder Querschnittstechnologien als Betrachtungsobjekte (z. B. Energie, Materialtechnik, Produktionstechnik, Nano- und Mikro-

systemtechnik, Informations- und Kommunikationstechnologien) (FhG 2004; Seiler et al. 2004).

Die ungeordnete Vielfalt bionischer Aktivitäten führt damit zu erheblichen Schwierigkeiten bei Klassifikationsbemühungen. Es scheint keine logisch befriedigende Einteilung geben zu können. Die vorliegenden Einteilungen sind pragmatisch orientiert und historisch gewachsen. Aus diesem Grund wird hier keine eigene Unterteilung vorgeschlagen, sondern für den weiteren Verlauf lediglich folgende Einteilung vorgenommen:

- Zur klassischen Bionik gehören Bau und Klimatisierung, Konstruktionen und Geräte, Formgestaltung und Design, Verfahren und Abläufe, Materialien und Strukturen sowie Lokomotion. Ein wichtiges aktuelles Forschungsfeld mit erheblichem Anwendungspotenzial stellen neue Materialien dar (vgl. hierzu die Vertiefungsanalyse in Kap. IV.2 und IV.3).
- Die neue Bionik schließt an aktuelle Entwicklungen in Nanotechnologie und Evolutionsbiologie an. Sie umfasst einerseits molekularbiologisch inspirierte Mikroansätze der Nanobiotechnologie (Kap. V.1), der Prothetik und der neuronalen Steuerung (Kap. V.2) mit engen Verbindungen zu den „konvergierenden Technologien“ (Roco/Bainbridge 2002). Andererseits bestehen neue Verbindungen aus der Evolutionsbiologie vor allem zur Informationstechnik (Kap. V.3).

Diese Einteilung hat zunächst lediglich einen pragmatischen Wert. Da sich jedoch die neue Bionik noch stark im Forschungsstadium befindet und vielfach noch mit den Grundlagen befasst ist, besteht hier sozusagen ein natürliches Gefälle in Bezug auf die Anwendungen. Bereits im Markt etablierte Anwendungen sind praktisch sämtlich Ergebnisse der klassischen Bionik, während Anwendungen für die neue Bionik eher Potenzialcharakter haben.

2. Bionik in Deutschland

Angesichts der genannten Schwierigkeiten einer Klassifikation wird im Folgenden der Überblick über die Bionik-Szene in Deutschland nicht nach Bionik-Feldern, sondern nach den Strukturmerkmalen Forschungsfelder, Marktpotenziale, Unternehmen, Patentsituation, Netzwerke, Lehre und Forschungsförderung angeordnet.

2.1 Forschungsfelder

Die Bionik ist in Deutschland als Forschungsthema an zahlreichen Universitäten und universitären sowie außeruniversitären Forschungseinrichtungen vertreten. Das thematische Spektrum ist dabei außerordentlich breit und umfasst Beiträge zu fast allen bionischen Teilgebieten (für das Folgende vgl. UMSICHT 2005, S. 50 ff. sowie Anhang 1 dieser Studie mit einer detaillierten Übersicht der Themen und Akteure):

- Stoffe (Chemikalien, Materialien), (funktionale) Mikrostrukturen, Ober- und Grenzflächen einschließlich der Bildungs- und Umwandlungsprinzipien von Stoffen, Materialien und Materialverbänden. Themengebiete sind vor allem neue Materialien wie Naturfa-

serverbundstoffe, Smart Materials, Klebmaterialien und Leichtbau, neue (z. B. selbstreinigende oder selbstreparierende) Oberflächenstrukturen (vgl. dazu auch Forschungsfelder in Kap. IV.2).

- Statische Konstruktionen (Leichtbau, Tragwerke, Flug-, Fahr- und Schwimmkörper). Themenbeispiele sind die Nutzung pflanzlicher Achsen, die Evolution pflanzlicher Wuchsformen, Leichtbaustrukturen und Fragen der Reibungsminimierung an Schwimm- und Flugkörpern.
- Dynamische Systeme (Sensorik, Aktorik, Lokomotion, Robotik). Hier geht es z. B. um Biosensorik, Energieminimierung bei der Fortbewegung, bionisch inspirierte Robotik, insbesondere um Laufmaschinen auf der Basis natürlicher Fortbewegungsmechanismen, um bionische Roboterbestandteile wie Arme und um neuronale Netze. Auch die Schnittstelle zwischen lebenden Systemen (z. B. dem Menschen) und Maschinen (Bioelektronik, Ergonomie, Prothetik und kybernetische Organismen) wird bearbeitet (Kap. V.2).
- Prozesse (Geräte, Maschinen, Verfahren, Impuls-, Wärme- und Stofftransport). Beispiele sind Gebäude- Lüftungssysteme nach natürlichen Vorbildern (z. B. Termitenhügel) und die biosolare Wasserstoffproduktion.
- Datenübertragung und -verarbeitung (Optimierung mittels Evolutionsstrategien, Funkübertragung, Routing etc.). Wesentliches Thema ist die evolutionäre Optimierung von Datenübertragungs- und -verarbeitungssystemen sowie entsprechender Algorithmen, z. B. für sensorgetriebene und kognitive Systeme zur Robotersteuerung (vgl. das Vertiefungsfeld in Kap. V.3).
- Organisationsformen (industrielle Ökologie, Management). Die so genannte Organisationsbionik befasst sich mit Managementkonzepten auf der Basis von Prinzipien der Selbstorganisation in Entgegensetzung zu hierarchischen Strukturen (vgl. hierzu das Vertiefungsfeld in Kap. V.4).

Die Intensität dieser Forschungsaktivitäten (messbar etwa über die Größe der Arbeitsgruppe, Zahl der Veröffentlichungen oder Zitierungen) sowie ihre internationale Sichtbarkeit und Innovationserfolge sind durchaus auf unterschiedlichem Niveau. Große Anwendungs- und auch Forschungsbereiche sind Materialien/Mikrostrukturen/ Grenz- und Oberflächen, statische Konstruktionen, dynamische Systeme sowie Datenübertragung und -verarbeitung.

2.2 Anwendungen und Marktpotenziale

Bionik zielt letztlich auf innovative Umsetzungen für die Praxis (Kap. II). Für bionische Produkte existiert jedoch kein eigener „Markt“. Vielmehr müssen sich bionische Produkte auf bereits bestehenden Märkten in der Konkurrenz mit etablierten Produkten durchsetzen. Da die Durchsetzung bionischer Produkte auf diesen Märkten und eine zukünftige Marktdurchdringung nicht prognosti-

zierbar sind, lassen sich für die einzelnen Bereiche der Bionik (unabhängig von der gewählten Einteilung, vgl. UMSICHT 2005, Tab. 6 bis 2) die Marktpotenziale nicht quantitativ ermitteln. Aus diesem Grund verzichten wir vollständig auf die Angabe von Zahlen, die grundsätzlich problematisch wären und höchstens eine Scheinobjektivität erzeugen würden.

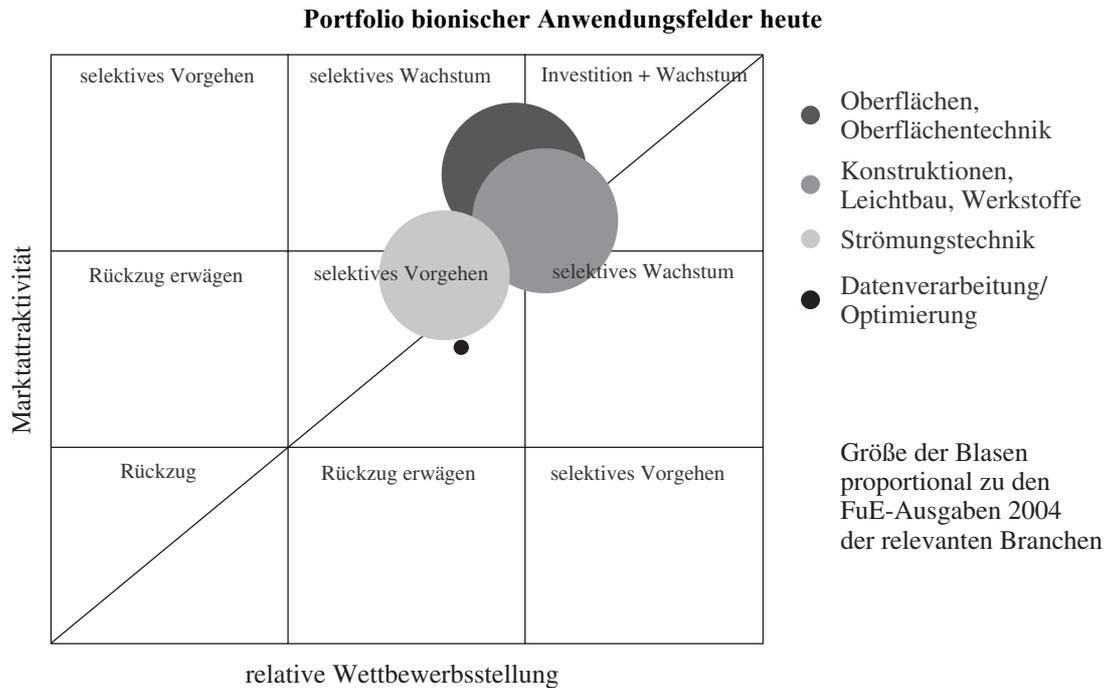
Die Darstellung im Folgenden erstreckt sich (auf der Basis des Gutachtens UMSICHT 2005) auf die qualitative Diskussion der Marktpotenziale, verbunden mit Beispielen zur Illustration und Plausibilisierung, wo immer dies möglich ist (vgl. auch die entsprechenden Vertiefungsfelder in Kap. IV). Dabei ist auch in Rechnung zu stellen, dass ein systematischer Einblick in Anwendungsfelder der Bionik, ihre Potenziale und Realisierungsbedingungen aufgrund der Datenlage und der fragmentierten Struktur der Bionik nicht gegeben werden kann. Was möglich ist, und dies wird im Folgenden vorgestellt, ist eine grobe Charakterisierung der wesentlichen Einsatzbereiche.

Gegenwärtig spielt die Bionik in den Bereichen Oberflächentechnik, Konstruktion/ Werkstoffe und Strömungstechnik bereits eine sichtbare Rolle in verschiedenen Anwendungsfeldern. Besonders im Bereich Oberflächen (Selbstreinigung), Werkstoffe und Konstruktion finden sich bionische Anwendungen und Produkte (Kap. IV.2). Hierbei wird nicht selten ein Bezug zur Nanotechnologie hergestellt, da diese Technologie eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung der bionischen Erkenntnis in die Anwendung darstellt. Im Endverbrauchermarkt haben vor allem Oberflächenbeschichtungen und Fassadenfarben mit dem Lotus-Effekt, das Reifenprofil der PremiumContact-Produktlinie von Continental oder die Jetconcept-Schwimmanzüge (Haifischhaut) von adidas oder auch Speedo eine gewisse Bekanntheit erreicht. Im Flugzeug- und Fahrzeugbau spielen bionische Lösungen vor allem beim Leichtbau und bei der Strömungsoptimierung eine Rolle.

Die wesentlichen Anwendungsfelder sind damit Massenmärkte mit entsprechend großem Stoffumsatz und Marktvolumen. Vor allem der Fahrzeugbau (zum Automobilbau vgl. Kap. IV.3.1) sowie der Bereich Bautechnik und Architektur (Kap. IV.3.2) sind hier zu nennen. Damit dominieren – nicht überraschend – die eher klassischen Felder der Bionik die gegenwärtige Anwendung, während die „neue“ Bionik sich praktisch noch nicht in volkswirtschaftlich nennenswertem Umfang in der Anwendung befindet.

Die genannten, heute bereits besetzten Anwendungsfelder der Bionik treffen auf großvolumige Märkte, in denen hohe FuE-Ausgaben vorliegen (UMSICHT 2005, Tab. 6 bis 2). In einer qualitativen Analyse der Marktsituation zeigt sich, dass die heutigen bionischen Anwendungsfelder gut aufgestellt sind (Abb. 1). Zum einen macht die Tatsache, dass es sich um große Märkte handelt, diese sehr attraktiv. Zum anderen erschwert diese Situation jedoch teilweise den Marktzugang, da bionische Produkte – die häufig preislich noch nicht konkurrenzfähig sind – dort auf starke und etablierte Konkurrenz treffen. Diese Ambivalenz lässt sich einerseits über die positive öffentli-

Abbildung 1



Quelle: UMSICHT 2005

che Bewertung der Bionik zum Positiven wenden, z. B. über gezielte Werbung mit dem Attribut „bionisch“ (dazu Kap. III.2.3). Andererseits hat die Bionik stets das Potenzial, durch neue Funktionalitäten – für die auch höhere Preise verlangt werden können – in diesen Märkten aufzufallen (z. B. durch neue Material- und Oberflächeneigenschaften, vgl. Kap. IV).

Anwendungsfelder auf der Basis der neuen Bionik zeigen darüber hinaus ein zukünftiges Innovationspotenzial. Dies betrifft die Bereiche Sensorik/Aktorik, Robotik, Informations- und Kommunikationstechnik, Logistik, Organisation und Management. Sensorik und Robotik als Bereiche, in denen bionische Forschung sehr aktiv ist, versprechen stark wachsende Märkte. Im Bereich der Medizintechnik wird speziell der Biosensorik und der Prothetik (Kap. V.3) eine rasch wachsende Bedeutung zukommen. Ein größeres Fragezeichen steht hinter dem Bereich Organisation und Management (Kap. V.4; vgl. a. Blüchel 2005). Es ist noch nicht erkennbar, wann aus laufenden Forschungsarbeiten anwendbares Wissen zu Innovationen führt.

Stellt man die Frage, inwieweit Innovationspotenziale und Marktchancen ausgeschöpft werden, ist zunächst ein starkes Bemühen anzuerkennen, der Bionik eine stärkere Bedeutung im Innovationsprozess zu geben. Die kritische Masse für die Bionik, um den Innovationsprozess maßgeblich zu gestalten, ist jedoch weder national noch inter-

national erreicht. Bionik bleibt zumeist marginal, gemessen an den Stoffumsätzen oder Marktvolumina der Anwendungsfelder – auch derjenigen, in denen man am ehesten von einer bereits erreichten Praxisrelevanz bionischer Entwicklungen sprechen kann.

Es lassen sich einige spezifische Hemmnisse für eine größere Rolle der Bionik im Innovationssystem ausmachen (UMSICHT 2005 in Anlehnung an Küppers 2001, Küppers 2004): So vergehen nicht selten zwischen biologischer Erkenntnis bzw. identifiziertem biologischen Vorbild und hergestelltem bionischen Produkt Jahre bis Jahrzehnte. Neue Verfahren (z. B. der Nanotechnologie) versprechen erhebliche Verbesserungen; dies ist jedoch bislang nicht demonstriert worden. Weiterhin ist die Industrie – von aktiven Ausnahmen abgesehen – eher zögerlich, in umfassende Bionikprojekte zu investieren. Vorbehalte gegenüber der Leistungsfähigkeit bionischer Produkte und ihrer Konkurrenzfähigkeit verbinden sich teilweise mit einem Misstrauen gegenüber dem bionischen „Denken“. Dementsprechend ist die kritische Masse an Kooperationen zwischen Forschung und Industrie in den meisten Fällen nicht erreicht. Ein deutlicher Teil der FuE-Ausgaben der Wirtschaft wird in die Verbesserung hergebrachter Technologie investiert, obwohl klar ist, dass damit höchstens marginale Erträge erzielt werden können. Dass Ergebnisse der Bionik zum Teil revolutionäres Potenzial haben, wird seitens der Industrie häufig

nicht nur als Chance, sondern auch als Bedrohung empfunden. Hier besteht sicher noch erhebliches Verbesserungspotenzial.

2.3 Unternehmen

Die Haltung der Wirtschaft zur Bionik ist ambivalent. Zum einen wird die öffentliche Wertschätzung des Attributes „bionisch“ durchaus gesehen und z. B. vielfach für Werbezwecke genutzt. Auf der Umsetzungsseite ist gegenüber bionischen Ideen jedoch häufig eine gewisse Reserviertheit festzustellen. Bevor nach den Ursachen hierfür gefragt wird, sei diese ambivalente Situation etwas näher erläutert.

Eine ganze Reihe von Unternehmen wirbt für ihre Produkte mit dem Attribut „bionisch“. Abgesehen davon, dass dies etwas über die Annahme einer positiven Bewertung dieses Begriffs durch mögliche Kunden und die Öffentlichkeit aussagt, ist damit nicht unbedingt auch die Nutzung bionischer Prinzipien in den Produkten verbunden. So bewirbt die S.K. Enterprise – Gesellschaft für bionische Lebensmittel GmbH ihr Produkt LipLac als „erstes und einzigartiges bionisches Genussgetränk mit international nachgewiesener Wirksamkeit“. LipLac nutzt nach eigenen Angaben die biologische Aktivität eines Nahrungssubstanzkomplexes, um den körpereigenen Regelkreislauf zielgerichtet zu steuern und so Cholesterin abzubauen und durch das Abfangen freier Radikale Arterienverkalkung zu verhindern (SKE 2005). Damit handelt es sich jedoch nach den üblichen Definitionen (Kap. II.2) nicht um Bionik, sondern um die Nutzung biologischer Wirkstoffe. Ein weiteres Beispiel für die eher undifferenzierte Nutzung des Begriffs Bionik zu Werbezwecken bietet die P.I.E.R. Hausbau GmbH. Sie bewirbt einen BIONIK-Wohnpark mit „modernsten, qualitativ hochwertigen und preiswerten Modulare Öko-Energiespar-Solarhäusern“, die „durch Erfindungen qualitativ sehr hochwertig, trotzdem preiswert und betriebskostenminimal“ seien (Pier Hausbau 2005).

Auf der anderen Seite gibt es Unternehmen, die Produkte auf der Grundlage bionischer Prinzipien entwickeln, diese Eigenschaft jedoch nicht bewerben. Beispielhaft hierfür sei die BASF genannt, die an der Entwicklung von Nanostrukturen mit Lotus-Effekt arbeitet. Ein BASF-Forschungsprojekt ist die Entwicklung eines als „Lotus-Stein“ bezeichneten Materials für Anwendungen im Baubereich, das sogar mit Schleifpapier abgeschliffen werden kann, ohne dass der Lotus-Effekt seine Wirkung verliert (BASF 2002; Frost/Sullivan 2004). Obwohl explizit auf den Lotus-Effekt Bezug genommen wird, werden diese Entwicklungen der BASF nicht als bionisch charakterisiert, sondern der Nanotechnologie zugeordnet.

In der Bionik sind sowohl große Unternehmen wie Degussa, BMW, Daimler-Chrysler, Opel, Siemens oder BASF (Kistenfeger 2005) als auch eine Reihe von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) aktiv (UMSICHT 2005, Kap. 7 u. 8; vgl. Anhang 2). Wegen der genannten Schwierigkeiten ist es jedoch nicht möglich, den Markt und die Verbreitung bionischer Produkte in Deutschland quantitativ genau zu erfassen. Deutlich wird, dass in den

Bereichen „Stoffe, funktionale Mikrostrukturen und -oberflächen“ sowie „statische Konstruktionen (Leichtbau, Tragwerke, Flug-, Fahr- und Schwimmkörper)“ mit Abstand die meisten Unternehmen „bionisch“ aktiv sind. Für die aktuelle Situation lässt sich hier – trotz der Probleme der Recherche und Auswertung – schließen, dass gegenwärtig die, relativ gesehen, größten Umsätze mit bionischen Produkten in diesen Bereichen gemacht werden.

Neben diesen grundsätzlich positiven Einstellungen zur Bionik gibt es vielfach jedoch auch eine erkennbare Zurückhaltung. Das Vertrauen in die Verlässlichkeit bionischer Lösungen ist insbesondere in Feldern mit sehr hohen technischen Anforderungen teils wenig ausgeprägt (hierzu gehören einige Bereiche der neuen Materialien, vgl. Kap. IV). Auch wird gelegentlich das Problem genannt, dass bionische Lösungen die erforderlichen großen Mengen für einen Massenmarkt nicht oder nur zu nicht konkurrenzfähigen Preisen beibringen könnten (z. B. in der Klebetechnik, Kap. IV.2.3). Eher zwischen den Zeilen kann auch ein Misstrauen gegen den bionischen Ansatz der Selbstorganisation herausgelesen werden, der den klassischen betriebswirtschaftlichen Planungsstrategien diametral entgegengesetzt ist (Kap. V.3). Es lassen sich also die bestehenden Vorbehalte unterscheiden nach Misstrauen in die konkreten Produkteigenschaften und Konkurrenzfähigkeit sowie Misstrauen in die bionische „Denkweise“ oder „Kultur“.

2.4 Patentsituation

Patenterteilungen stellen einen wichtigen Indikator für die Innovationskraft eines Forschungsfeldes dar. Die Patentrecherche bionischer Erfindungen ist allerdings mit Schwierigkeiten in zwei Richtungen konfrontiert. Zum einen werden bzw. wurden früher Patente häufig nicht mit dem Attribut „bionisch“ gekennzeichnet, obwohl sie einem bionischen Gedankengang entsprungen sind. Zum anderen muss sich jedoch hinter einer als bionisch deklarierten Erfindung nicht unbedingt ein bionischer Ansatz verbergen. „Bionik“ ist kein geschützter oder klar definierter Begriff. Ob die Attribution „bionisch“ im Einzelfall zutreffend ist oder nicht, könnte nur in einer aufwendigen Detailrecherche entschieden werden. Aus diesen Gründen erlaubt eine Patentrecherche auf der Basis der Bezeichnungen der Patente nur eine zurückhaltende Interpretation.

Die Zahl der Patentanmeldungen, in denen Erfindungen als bionisch beschrieben werden, ist deutlich zunehmend. So ergab eine Patentrecherche über die Patentdatenbank depatisnet des deutschen Patent- und Markenamtes, über die auch ein Zugriff auf umfangreiche Sammlungen ausländischer Patentdatenbanken erfolgt (u. a. die Patentdatenbank des Europäischen Patentamtes und die Datenbank des amerikanischen US Patent- and Trademark Office) für den Suchbegriff „Bionik“ 47 Treffer, für den Suchbegriff „bionisch?“ 73 Treffer, für den Suchbegriff „biomimetic?“ 212 Treffer und für den Suchbegriff „bio-inspired“ vier Treffer. Obwohl diese Trefferlisten sicherlich einige Doppelungen erhalten (einzelne Patente sind sowohl durch Offenlegungsschrift als auch Patentschrift vertreten), ist die Anzahl beachtlich (UMSICHT 2005, S. 63).

Tabelle 3

Patentrecherche depatisnet

Suchbegriff	Trefferanzahl	Suchbegriff	Trefferanzahl
Bionik	47	hydrophob?	79.928
bionisch?	73	superhydrophob?	47
biomimetic?	212	ultrahydrophob?	86
bio-inspired	4	Vorbild der Natur	16
Lotus?Effekt	121	selbstheilend?	702
Lotus?effect	27	self-repair?	524
anti-fouling	924	self-heal?	703
selbstreinigend?	3.979	selbst-organi?	234
self-clean?	5.554	self-organi?	1.069

Quelle: nach UMSICHT 2005, S. 64; „?“ steht für eine beliebige Anzahl von Zeichen

Noch größer wird die Anzahl der (potenziell) „bionischen“ Patente, wenn gezielt nach einzelnen Begriffen recherchiert wird, die bionische Erfindungen beschreiben oder charakteristisch für bionische Produkte sind (Tab. 3). Selbst wenn man davon ausgeht, dass es einige Überlappungen gibt und es sich bei einem Großteil dieser Patentanmeldungen nicht um tatsächlich bionische Erfindungen handelt, kann man feststellen, dass inzwischen eine stattliche Anzahl von Patenten auf Erfindungen unter Nutzung der Bezeichnung „Bionik“ oder „bionisch“ angemeldet wurde.

2.5 Netzwerke

Netzwerke und Fachgesellschaften stellen wichtige Elemente der Forschungsinfrastruktur dar. In Deutschland gibt es zum Thema Bionik das überregional aufgestellte Bionik-Kompetenz-Netz BIOKON mit Sitz in Berlin und das regionale Kompetenznetz Biomimetik in Freiburg. Darüber hinaus sind die Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik (GTBB) und der Verein BIONALE – Lernen von der Natur e.V. mit Sitz in Starnberg zu nennen.

BIOKON ist ein vom BMBF seit 2001 gefördertes, bundesweites Bionik-Kompetenz-Netz mit zurzeit 28 Mitgliedern – 15 davon Universitäten oder universitäre Einrichtungen –, dem die wichtigsten deutschen Arbeitsgruppen im Bereich Bionik angehören. Hauptsächlich bildet es eine Plattform für den fachlichen Austausch. Gleichzeitig dient BIOKON Interessierten aus Industrie, Bildung und Medien als Ansprechpartner, bietet fachliche Beratung zu Bionikthemen, vermittelt die jeweiligen Fachansprechpartner, organisiert Bionik-Veranstaltungen und stellt umfassende Informationen zur Bionik in Deutschland bereit (Biokon 2005a). BIOKON ist in acht thematische Fachgruppen und vier ständige Fachgruppen „Medien, Internet, Datenbanken, Öffentlichkeitsarbeit, Presse“, „Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik“, „Ausstellungen, Messen, Kongresse, Workshops, Tutorials, Exponate“ und „Industrielle Umsetzung“ organisiert (Tab. 4).

Das Kompetenznetz Biomimetik wurde Ende 2002 gegründet. Kooperationspartner sind die Universität Freiburg, die Universität Tübingen und das ITV Denkendorf. Die Förderung erfolgt über das Landesministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst. Das Kompetenznetz dient als Plattform für Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen und Partner aus Industrie und Wirtschaft. Ziel ist die gemeinsame Entwicklung von Produkten und Technologien. Die Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung neuer technischer Textilien (Vorbild pflanzliche Wassertransportsysteme), in der Produktion von selbstreparierenden und selbstadaptiven Materialien (Smart Materials) und in der Umsetzung pflanzlicher Strukturprinzipien in gewichts- und strukturoptimierte Gradientenmaterialien (Biomimetik 2005).

Die Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik (GTBB) wurde im Jahr 1990 von Prof. Nachtigall (Universität des Saarlandes) ins Leben gerufen, um u. a. die Bionik einer breiteren Öffentlichkeit bekannt zu machen. Die aktuelle Mitgliederzahl liegt bei 310. Zum kommerziellen Angebot der GTBB gehören ein Informationsdienst zum Thema Technische Biologie und Bionik und die Vermittlung von Ansprechpartnern zur Unterstützung bei der Lösung von Problemen, die möglicherweise mit bionischen Ansätzen gelöst werden können (GTBB 2005).

Der Verein BIONALE – Lernen von der Natur e.V. sieht sich als populäres Bionik-Forum und möchte eine Plattform bieten für den interdisziplinären Austausch und die Förderung innovativer Ideen, die von der Natur inspiriert wurden. Ziel ist die Förderung der Interaktion und Kooperation zwischen Künstlern, Wissenschaftlern, Designern, Technikern, Architekten, Unternehmern, Ärzten etc. Der Verein hat es sich zur Aufgabe gemacht, jährlich Kunst- und Fotowettbewerbe zum Thema Bionik auszurichten und Finanzierungsprogramme zur Unterstützung junger Künstler, Wissenschaftler, Ingenieure, Designer und Fotografen zu erarbeiten. Fernziel ist die Schaffung einer Bionikakademie zur Nachwuchsförderung (Bionale 2005).

Tabelle 4

Biokon-Fachgruppen

Fachgruppen	Koordination	Ziel
B1 „Architektur, Design“	Architekturbüro Oligmüller, Bochum	Begleitung von Bionik-Projekten und Beratung hinsichtlich Design, Öffentlichkeitsarbeit, Industriekontakte
B2 „Leichtbau, Materialien“	Forschungszentrum Karlsruhe, Universität Freiburg	Darstellung des Wissensstandes bionischer Leichtbauprinzipien und Materialien und fachlicher Austausch
B3 „Oberflächen und Grenzflächen – Strukturen und Funktionen“	TU Dresden	kooperative Kompetenzzentrale für bionische Oberflächen und Grenzflächen
B4 „Fluidynamik, Fliegen, Schwimmen, Robotik, DAMS“	Universität Bonn, Zoologie	Forschungsgruppe zur Ergänzung des physiologischen Kenntnisstands der Biologie mit dem Ziel des technischen Erkenntnisgewinns
B5 „Biomechatronik, Biomedizintechnik, Mikrosystemtechnik, Aktuatorik, Robotik“	TU Ilmenau	gemeinsame Projektbearbeitung im Bereich Robotik und Biomechatronik
B6 „Sensorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation“	Universität Bonn, Zoologie	Identifizierung technischer Anwendungsfelder für bionische Sensoren und Sensorsysteme
B7 „Bionische Optimierungsmethoden“	Forschungszentrum Karlsruhe	Darstellung des Wissensstandes und fachlicher Austausch der Mitglieder
B8 „Bionik-Film“	TU Berlin, FG Bionik und Evolutionstechnik	k. A.

Quelle: nach UMSICHT 2005, geändert

2.6 Lehre und Bildung

Bionik in der Lehre ist wenig verankert. Häufig sind es Spezialangebote auf Initiative einzelner Personen hin. Den einzigen Vollstudiengang „Bionik“ bietet der Fachbereich Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissenschaften der Hochschule Bremen an. Dort startete zum Wintersemester 2003/2004 der weltweit einzige internationale Studiengang Bionik, der mit dem Bachelor of Science abschließt.

An Technischen Universitäten gibt es einige Lehrveranstaltungen zur Bionik. An der RWTH Aachen ist das Thema Bionik in den Fächern Biologie, Medizin, Maschinenbau und in der Informations- und Elektrotechnik vertreten. An der TU Berlin wird Bionik im Fachgebiet „Bionik und Evolutionstechnik“ am Institut für Verfahrenstechnik gelehrt. Die TU Darmstadt bietet Bionik als Studienschwerpunkt innerhalb eines natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Studiums an. Seit dem Wintersemester 2002/2003 existiert dort der Interdisziplinäre Studienschwerpunkt Bionik mit 30 Einzelveranstaltungen. An der Universität Freiburg werden im Biologie-

Hauptstudium in der Fachrichtung Botanik diverse Veranstaltungen zum Thema Bionik angeboten. An der TU Ilmenau wird Bionik im Rahmen des 2002 neu eingerichteten Fachgebiets Biomechatronik unterrichtet, das Bestandteil des Studiengangs Biomedizinische Technik ist.

An der Universität des Saarlandes ist mit der Emeritierung von Professor Werner Nachtigall im Herbst 2002 auch der von ihm initiierte Studiengang „Technische Biologie und Bionik“ ausgelaufen. Eine neue Professur zum Thema Bionik ist nicht geplant.

An Schulen ist Bionik kein fester Bestandteil von Lehrplänen. Es gibt allerdings eine Vielzahl von Initiativen, die darauf hinweisen, dass in zahlreichen Schulen Projekte und Veranstaltungen zum Thema Bionik durchgeführt werden. So lieferte die Abfrage „Bionik+Projekt+Gymnasium“ bei Google 645 Treffer. Beispielhaft seien hier das Projekt „Bionik – Konstruktion von Laufrobotern nach dem Vorbild der Natur und deren Steuerung über den Computer“ des Werner-von-Siemens-Gymnasiums in Berlin und das fünftägige Bionik-Science

Camp an der Montessori-Schule Hofheim genannt. Auch bietet sich der Besuch von Ausstellungen⁵ mit entsprechenden Exponaten an.

2.7 Forschungsförderung

Forschungsförderung stellt ein wesentliches Medium dar, um neuen Entwicklungen einen Raum des Experimentierens zu eröffnen. Im universitären Bereich hat der DFG Sonderforschungsbereich 230 „Natürliche Konstruktionen“ an den Universitäten Stuttgart und Tübingen für die deutsche Bionik-Forschung eine bedeutende Schrittmacherfunktion gehabt.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) schrieb im Dezember 2003 erstmalig den Ideenwettbewerb „Bionik – Innovationen aus der Natur“ aus, in dessen Rahmen 30 Studien gefördert wurden. In einer zweiten Runde dieses Ideenwettbewerbs, die im September 2005 ausgeschrieben wurde, sollen maximal 20 Studien gefördert werden. Mit dem neuen Förderkonzept „Bionik – Innovationen aus der Natur“ bündelt das BMBF die Fördermaßnahmen auf diesem Gebiet und stellt in den Jahren 2006 bis 2010 bis zu 50 Mio. Euro Fördermittel bereit (BMBF 2005a u. b). Im Rahmen der 2004 begonnenen Fördermaßnahme „Innovationen als Schlüssel für die Nachhaltigkeit in der Wirtschaft“ machte das BMBF u. a. das Thema „Neuartige Konstruktionsprinzipien und Bauteile oder Geräte (u. a. nach bionischen Konzepten bzw. Vorbildern aus der Natur)“ zum Gegenstand der Forschung. Eine Übersicht über die BMBF-geförderten Forschungsvorhaben, die sich mit der Bionik beschäftigen, findet sich in dem Gutachten von UMSICHT (2005, Anhang 8).

3. Bionik im internationalen Umfeld

Vor allem in den USA, Japan, China, Großbritannien, Schweden, den Niederlanden, Frankreich sowie Russland wird Bionik-Forschung im weiteren Sinne betrieben (UMSICHT 2005, S. 42). In diesen Ländern finden sich im Wesentlichen ähnliche Felder in bionischer Forschung und Anwendung wie in Deutschland. In den USA und Großbritannien – die neben Deutschland als führend einzustufen sind – lassen sich Schwerpunkte in den Feldern Werkstoffe und Robotik erkennen, im Übrigen Europa (außer Deutschland) liegen diese auf dem Gebiet der Stoffbildungs- und -umwandlungsprozesse. Asiatische Länder legen tendenziell auf Werkstoffe und Robotik starkes Gewicht. Allerdings erwies es sich dort aufgrund der nicht immer sehr ins Detail gehenden englischsprachigen Außendarstellung der Forschungseinrichtungen als schwierig, Akteure auf dem Gebiet der Bionik und ihre jeweiligen Fachgebiete zu recherchieren.

Die Motive für bionische Forschung liegen zum Teil – soweit diese Informationen zugänglich sind – im militäri-

schen Bereich. So war der Kongress in Dayton 1960, der als eine der Geburtsstätten der Bionik gilt, ein Militärkongress, bei dem es z. B. auch um folgende Anwendungen ging (BMBW 1970; Küppers 2001): Fledermaussonar für militärische Ortungssysteme, IR-Grubenorgan von Schlangen für militärische IR-Detektoren oder Körperformen von Fischen und Vögeln für Militärflugzeuge und Raketen. Andererseits geht es darum, sich durch bionische Forschung mögliche Vorteile im globalen Wettbewerb zu sichern. Die „Bionik als Versprechen“ im Sinne des Kapitels II.3 nimmt im Ausland nur wenig Raum ein. Die in vielen Bereichen insgesamt herausragende Position Deutschlands wird auch im Ausland anerkannt.

In Internet- oder Literaturrecherchen zur Bionik tritt grundsätzlich die Schwierigkeit auf, dass der Begriff der Bionik oder damit verwandte Begriffe (Kap. II.2.1) nicht grundsätzlich zur Bezeichnung entsprechender Forschung verwendet wird. Forschung zu bionischen Themen wird nicht zwangsläufig als solche deklariert. So wurden z. B. am Laboratory of Organic Solids der Chinesischen Akademie der Wissenschaften Nanotube-Beschichtungen nach dem Vorbild des Geckofußes entwickelt (CAS 2005), ohne dass die Bezeichnungen „bionic“ oder „biomimetic“ verwendet wurden (das Label „nano“ scheint hier attraktiver zu sein).

Aufschlüsse über die internationale Verteilung der Aktivitäten gibt – vorbehaltlich der genannten methodischen Probleme – eine Analyse der wissenschaftlichen Publikationen zur Bionik (Abb. 2 auf der Basis einer Abfrage in der Datenbank SciFinder). Dabei zeigt sich das eingangs erwähnte Bild. Insgesamt nehmen Forschungsaktivitäten zur Bionik in Asien deutlich zu. 2003 fand am Shanghai Institute for Advanced Studies ein Roundtable-Meeting unter dem Motto „Nature as Engineer and Teacher“ mit Beteiligung zahlreicher deutscher Bionik-Experten statt (SIAS 2003). Auch das seit 2004 von der chinesischen Jilin University veröffentlichte „Journal of Bionics Engineering“ ist ein deutliches Indiz für ein verstärktes Engagement asiatischer Forschungseinrichtungen.

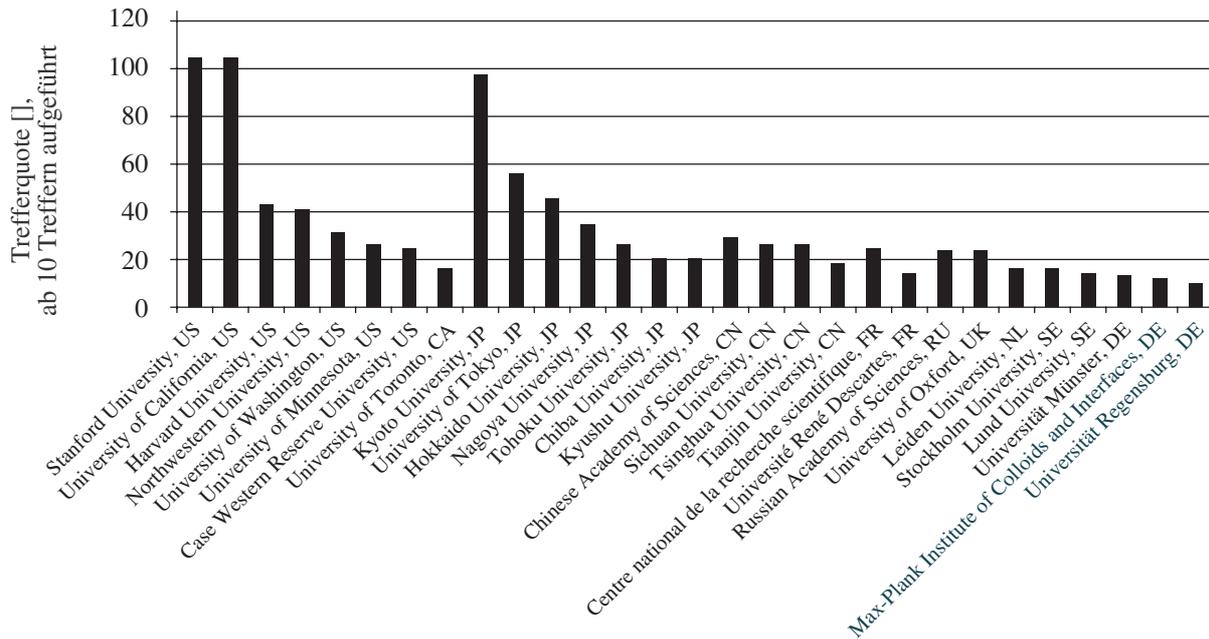
Die europäische Spitzenposition bei den Publikationen nimmt das französische Centre national de la recherche scientifique (24) vor der Russian Academy of Sciences (23) und der britischen University of Oxford (23) ein. Ebenfalls vertreten sind die Leiden University aus den Niederlanden (16), die schwedische Stockholm University (16), die ebenfalls schwedische Lund University (14) und die französische Université René Descartes (14).

Im Jahr 2002 wurde an der University of Reading das bislang einzige internationale Bionik-Netzwerk „BIONIS – network for industrial sustainability“ gegründet. Seine Ziele sind die Vermarktung bionischer Lösungsansätze, die Koordinierung und Förderung wissenschaftlichen Austausches und des Austausches zwischen Forschung, Industrie und Finanzsektor; die Auslotung akademisch-industrieller Kooperationen sowie Öffentlichkeitsarbeit. Aktuell hat BIONIS weltweit 190 Mitglieder in 33 Ländern. Bisherige thematische Schwerpunkte des Netzwerkes sind Energie- und Ressourceneffizienz, Ersatz oder Kontrolle gefährlicher Substanzen, erneuerbare und bio-

⁵ Ein Beispiel wäre hier etwa das Zukunftszentrum Mensch-Natur-Technik-Wissenschaft (ZMTW) der Nieklitzer Ökologie- und Ökotechnologie Stiftung (NICOL) in Nieklitze, in welcher eine Dauerausstellung mit bionischen Exponaten zu finden ist.

Abbildung 2

Publikationen ausschließlich aus Universitäten mit bionischem Bezug (SciFinder-Datenbank)



Quelle: UMSICHT 2005, ergänzt durch Rettweiler (2006). Für die Darstellung wurden Treffer ab zehn Einträgen in der Datenbank verwendet. Anderweitige Veröffentlichungen (z. B. von Privatpersonen zum Thema Bionik) sind in SciFinder nicht verzeichnet. Legende: US: USA, CA: Kanada, JP: Japan, CN: China, FR: Frankreich, UK: Großbritannien, NL: Niederlande, RU: Russland, SE: Schweden, DE: Deutschland

abbaubare Materialien sowie neue Funktionalitäten von Materialien und Strukturen. Als Felder zukünftiger Netzwerkaktivitäten gelten biomedizinische und pharmazeutische Anwendungen, Architektur und Design, Anwendungen in Expertensystemen zur Entscheidungsunterstützung, Robotik sowie Erzeugung und Verpackung von Nahrungsmitteln (Bionis 2005).

4. Fazit

Die deutsche Bionik-Forschung ist thematisch breit aufgestellt und hat eine sehr gute Ausgangsbasis. Die erforschten Segmente der Bionik und die Anwendungsfelder treffen weitgehend auf attraktive Märkte im In- und Ausland. Sowohl etablierte als auch sich erst entwickelnde Bereiche der Bionik-Forschung sind darauf angelegt, innovative Beiträge zu industriell relevanter Forschung und Entwicklung zu leisten. In der Öffentlichkeit ist das Attribut „bionisch“ positiv besetzt und wird gerne für Werbezwecke eingesetzt.

Neben den USA und Großbritannien, die ähnlich gut wie Deutschland aufgestellt sind, sind vor allem Frankreich, die Niederlande und Schweden als stark in der Bionik engagiert zu nennen. Auch für Japan – hier besonders im Bereich Lokomotion und Robotik – und China (marine Bionik) wird ein großes Potenzial gesehen. Die Informa-

tionslage ist allerdings teils recht dünn, besonders in Bezug auf Russland und die USA, da dort viele Bionik-Projekte in der Militärforschung angesiedelt sind und entsprechend der Geheimhaltung unterliegen.

Die wissenschaftliche Bionik-Forschung in Deutschland ist durch Partnerschaft und Kooperation statt durch Konkurrenz und Wettbewerb geprägt. Dies zeigt die zentrale Bündelung der Kompetenzen im Netzwerk BIOKON und die Zuordnung der Mitglieder in thematisch unterschiedlich ausgerichtete Fachgruppen, in denen der wissenschaftliche Austausch und die Nutzung von Synergien im Vordergrund stehen. Diese Bündelung ist auch eine Stärke im internationalen Vergleich. Während es in anderen Ländern häufig schwierig ist und langwierige Recherchen erfordert, Akteure und Projekte auf dem Gebiet der Bionik zu identifizieren, bietet der BIOKON-Internetauftritt zumindest dem deutschsprachigen Besucher einen hervorragenden Überblick.

Generell wird ein starkes Bemühen erkennbar, der Bionik eine Bedeutung im Innovationsprozess zu geben. Es drängt sich aber der Eindruck auf, dass Bionik vielfach auf die Initiative und das Engagement einzelner Personen oder FuE-Einrichtungen zurückgeht. Die kritische Masse für die Bionik, um den Innovationsprozess maßgeblich zu gestalten, ist weder national noch international erreicht.

Zum einen liegt dies sicher daran, dass bionische Lösungsideen über eine sehr breite Palette von Anwendungsfeldern verstreut sind, so dass der jeweilige Anteil und damit Einfluss in den – zumeist großvolumigen – Anwendungsfeldern gering bleiben muss. Zum anderen lassen sich jedoch auch folgende Hemmnisse für eine größere Rolle der Bionik im Innovationssystem ausmachen (UMSICHT 2005 in Anlehnung an Küppers 2001 u. Küppers 2004):

- Vergleichsweise lange Entwicklungszeiten für bionische Produkte und Prozesse: Nicht selten vergehen zwischen biologischer Erkenntnis bzw. identifiziertem biologischen Vorbild und hergestelltem bionischen Produkt Jahre bis Jahrzehnte. Neue Verfahren (z. B. der Nanotechnologie) versprechen erhebliche Verbesserungen; dies ist jedoch bislang nicht demonstriert worden.
- Zurückhaltung bei der Industrie: Die Industrie – von aktiven Ausnahmen abgesehen – operiert zögerlich, in umfassende Bionikprojekte zu investieren. Vorbehalte gegenüber Leistungsfähigkeit bionischer Produkte und ihrer Konkurrenzfähigkeit verbinden sich mit einem Misstrauen gegenüber dem bionischen „Denken“. Dementsprechend wurde die kritische Masse an Kooperationen zwischen Forschung und Industrie in den meisten Fällen bislang nicht erreicht.
- Psychologische Barrieren: Ein deutlicher Teil der FuE-Ausgaben der Wirtschaft wird in die Verbesserung hergebrachter Technologie investiert, obwohl klar ist, dass damit höchstens marginale Erträge erzielt werden können. Dass Ergebnisse der Bionik zum Teil revolutionäres Potenzial haben, wird seitens der Industrie häufig nicht nur als Chance, sondern auch als Bedrohung empfunden.
- Konflikte zwischen Universitäten und Industrie: Nach Meinung von Experten kommt es vor allem mit der Großindustrie teilweise zu Problemen, da auf deren Seite häufig der Wunsch nach Übernahme der Forschungsergebnisse oder Produkte ohne entsprechende Honorierung steht. Bei erfolgreichen Innovationen erfolgt nicht selten eine rasche Marktbesetzung durch Großunternehmen, so dass Forscher und KMU nur noch in bescheidenem Umfang an der wirtschaftlichen Verwertung partizipieren können. Auch mangelnde patentrechtliche Kenntnisse und Erfahrungen auf Seiten der Forschung führen gelegentlich zu Konflikten mit der Industrie (UMSICHT 2005, S. 70).
- Marginale Forschungsförderung: die Forschungsförderung ist zwar in den letzten Jahren gestiegen, es besteht aber dennoch ein krasses Ungleichgewicht zwischen der Förderung für Bionik-Projekte und der Förderung „traditioneller“ Technik.
- Mangel an Kommunikation: Sowohl in Fachkreisen als auch in der breiten Öffentlichkeit ist das Thema Bionik trotz eines generell positiven Ansehens wenig vertreten. In allgemeinbildenden Schulen, Berufsschulen oder im Handwerk hat es einen geringen Stellenwert.

Deutschland gehört ohne Zweifel zu den bedeutenden Forschungsstandorten in der Bionik weltweit. Das wissenschaftlich hohe Niveau der deutschen Forschung gilt es auch in Zukunft zu halten. Die internationale Reputation muss weiter gestärkt werden, und bionische Herangehensweisen sind nachhaltig und zeitnah in die Innovationsprozesse der Industrie zu integrieren. Es wird für die Zukunft darauf ankommen, das Wissen aus der bereits geleisteten Forschungsarbeit an die nächste Bionik-Generation weiterzugeben und vor allem durch Ausbildung einen Multiplikatorenprozess zu initiieren. Dazu muss die bionische „Denkweise“ stärker in Bildung und Ausbildung integriert werden.

IV. Bionik für neue Materialien

An neue Materialien und technische Werkstoffe werden hohe Erwartungen geknüpft in Erfüllung immanenter Anforderungen und Aufgaben in verschiedensten Einsatzbereichen. Biologische Materialien zeichnen sich durch Eigenschaften und Funktionalitäten aus, wie hohe Stabilität bei ultraleichtem Gewicht, Anpassungsfähigkeit an neue Umgebungsbedingungen, Verschleißarmut oder auch Autoreparabilität. Daher sind diese für zukünftige Materialentwicklungen bedeutend. Zudem ist es ein Forschungsbereich der Bionik, der bereits industrielle Anwendungen vorweisen kann. Das Kapitel befasst sich zunächst mit der Verwendung des „konventionellen Materialbegriffs“ im Verhältnis zum „bionischen“ (Kap. IV.1). Zum Stand der Forschung (Kap. IV.2) werden ausgewählte Forschungsfelder herausgestellt, um Sicht- und Herangehensweisen an die bionische Materialforschung aufzuzeigen, die für ausgewählte Anwendungsfelder (Kap. IV.3) weiter konkretisiert werden. Abschließend werden Chancen und Risiken bionischer Werkstoffentwicklungen (Kap. IV.4) herausgestellt.

1. Begriffliches

Der Materialbegriff wird – auch im Zusammenhang mit bionischen Aspekten – nicht immer einheitlich verwendet. Da für „neue Materialien“ immer verfügbare Kriterien als Maßstab herangezogen werden, werden im Folgenden zur Einordnung relevante Aspekte aus der „klassischen Materialforschung“ aufgeführt.

1.1 Zum Begriff „neue Materialien“

Im Grunde genommen geht es in diesem Themenfeld um die Erfüllung immanenter materialtechnischer Herausforderungen, für die jeweils der Anwendungskontext entscheidend ist. Zwei Beispiele sollen dies illustrieren: So gehören etwa zu den geforderten Gebrauchseigenschaften bei Hochtemperaturwerkstoffen hohe thermische und mechanische Belastbarkeit, hohe chemische Beständigkeit der Materialoberflächen auch bei aggressiven Reaktionsbedingungen, geringes spezifisches Gewicht und hohe Zähigkeit, um eine entsprechend lange Lebens- bzw. Betriebsdauer⁶ bei wirtschaftlichem Betrieb zu gewährleisten. Andererseits werden etwa in der Medizin vor allem zwei Typen von Materialeigenschaften gesucht: Materialien, die mit biologischem Gewebe interagieren, z. B. für

Knochenimplantate, und die teilweise auch biologisch resorbierbar sind, sowie Materialien, die möglichst wenig mit anderen Substanzen und Strukturen in Wechselwirkungen treten, z. B. für medizinische Instrumente, die nicht verschmutzen (Bernstein et al. 2001, TAB 2003). Für beide exemplarisch herausgestellte Bereiche besteht für heute verwendeten Materialien und Werkstoffe noch ein nicht unerhebliches Verbesserungspotenzial, wozu auch beständig geforscht wird.

Der Begriff „neue Materialien“ wird – in Ermangelung einer allgemein anerkannten wissenschaftlichen Definition – oft in unterschiedlichen Bezügen verwendet. Im eher „klassischen Materialkontext“ hat er zumeist einen Werkstoffbezug, auch wenn in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion nach wie vor keine scharfe Trennung zwischen den Begriffen „Material“ und „Werkstoff“ existiert. Herkömmliche, etablierte Materialien und Werkstoffe zeichnen sich durch exakt festgelegte, vielfach genormte Materialkennwerte wie chemische Zusammensetzung oder mechanische Kennwerte aus (z. B. DIN 17100/EN 10025 für Baustahl). Sie sind zumeist in größeren Mengen verfügbar, kostengünstig herstellbar, weisen überprüfbare Qualitätskriterien auf und sind zudem vertraut im Umgang. Insbesondere die im Zusammenhang mit Werkstoffen entwickelten Erfahrungen, Prüfkriterien etc. repräsentieren den aktuellen Stand der Forschung und stellen damit eine gewisse „Messlatte“ für „neue Materialien“ dar.

In Anlehnung an frühere Arbeiten des TAB (TAB 1999) wird auch hier die wissenschaftlich-technisch orientierte Auffassung vertreten, den Bereich neuer Werkstoffe als den jeweils aktuellen Frontbereich der jeweiligen Forschung und Entwicklung anzusehen. Neue Werkstoffe sind demnach solche, die sich in ihrer physikalischen Struktur, ihrer chemischen Zusammensetzung oder in ihrer Funktion von verfügbaren unterscheiden. Dies lässt sich entsprechend auf den übergeordneten Begriff „Material“ übertragen.

Für den praktischen Einsatz von neuen bzw. weiterentwickelten Materialien und Werkstoffen spielen neben Gebrauchs- auch immer fertigungstechnische Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Hierzu gehören u. a. die Verarbeitbarkeit mit Hilfe etablierter Verfahren sowie – zur reproduzierbaren Herstellung von Werkstoffen, Bauteilen, Instrumenten etc. – das Vorhandensein entsprechender Prüfkriterien. Gerade hier liegen Vorteile klassischer Werkstoffe, die von neuen Werkstoffen und Materialien in wesentlichen Eigenschaften erst übertroffen werden müssen (TAB 1999).

Die Entwicklung von neuen Materialien erfolgt grundsätzlich auf zwei verschiedenen Pfaden, zum einen durch Modifikation der physikalischen Struktur oder chemischen Zusammensetzung konventioneller Materialien und Werkstoffe oder auf der Basis neuer Konzepte. Für beide Richtungen lassen sich bionische Konzepte und Anregungen verwenden.

⁶ Hochtemperaturwerkstoffe werden z. B. in Gasturbinen eingesetzt. Dort liegt die geforderte Lebensdauer bei ca. 100 000 h (TAB 1999).

Antriebskräfte für neue Entwicklungen liegen in immer präziseren Anforderungen an den Material- bzw. Werkstoffeinsatz. Hierzu gehören z. B. die Einsparung von Energie (Minimierung von Energieverlusten bei der Herstellung und von Reibungsverlusten bei der Anwendung), der verstärkte Einsatz regenerativer Energieressourcen (Verminderung der Abhängigkeit von fossilen Ressourcen, Reduktion des Brennstoffverbrauchs, Nutzung biologischer Zellenergie), Verbesserung der Effizienz (Wirkungsgrade) technischer Prozesse, Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von technischen Systemen (Reduzierung der Herstellungs- und Betriebskosten, Erhöhung von deren Leistung sowie Verlängerung der Lebensdauer), Verbesserung der Umweltverträglichkeit (u. a. durch Reduktion von Abgasemissionen, Abbaubarkeit, Recycelbarkeit), bessere organische Verträglichkeit, Substitution problematischer Materialien, individuelle Anpassungsmöglichkeit.

1.2 Der Materialbegriff in der Bionik

Der Materialbegriff in der Bionik ist relativ weit gefasst und nicht wirklich präzise definiert.⁷ In der Bionik geht es dabei um die Suche nach „biologischem Wissen“ über Aufbau und Funktionsweise biologischer Materialien, welches extrahiert und dann auf konkrete technische Anwendungen übertragen werden kann. Es geht nicht um die Nutzung biologischer Stoffe selbst. Welche Erwartungen an biologische Materialien gestellt werden können, lässt sich anhand charakteristischer Merkmale von in der Natur entstandenen Materialien charakterisieren (vgl. a. Kap. II.3.2). Im Folgenden werden ausgewählte Aspekte aufgeführt (nach Nachtigall 2002, S. 57/58 und Nachtigall 1997, S. 21 f. u. S. 74 f.). Biologische Materialien

- schichten sich oft bereits während des Entstehungsprozesses.⁸ Die Materialschichten weisen dabei jeweils strukturfunktionelle Besonderheiten auf und entstehen oft zeitlich nacheinander. Dabei formen sich einzelne Plättchen sukzessiv und einander überlappend aus (z. B. Spinnenhaar). Die zusammengesetzten Materialien weisen neue Eigenschaften auf;
- differenzieren sich häufig durch Nutzung von Oberflächenkräften während der Genese aus. Ein Beispiel sind hier die Radiolarien (Strahlentierchen des Meeres), die ihre oft hochkomplexen Skelette nicht „Molekül für Molekül“ aufbauen; diese entstehen in einem einzigen „Gussvorgang“ (aus flüssiger Kieselsäure),

⁷ Eine gängige Definition bzw. Eingrenzung bezieht sich z. B. auf Materialien, biochemische, biophysikalische und Recycling-Aspekte, Materialkomplexe, Verbundmaterialien, biokompatible Materialien und Implantatwerkstoffe. Biologische Strukturelemente werden untersucht, beschrieben und verglichen. Die Eignung bestimmter unkonventioneller Materialien für spezielle Zwecke wird betrachtet. Auch unkonventionelle, naturentlehnte Strukturen wie z. B. anisotrope Verbundmaterialien und pneumatische Strukturen oder flächenüberspannende Membranstrukturen werden im Hinblick auf ihre Eignung für technische Großausführungen untersucht. Formbildungsprozesse im biologischen Bereich bieten unkonventionelle technische Vorbilder (nach Nachtigall 2002, S. 11).

⁸ Biologische Materialien werden selten „in einem Stück gefertigt“, sondern eher schrittweise (vergleichbar den „Strukturwerkstoffen“ in der „klassischen Werkstoffforschung“).

- wobei die Formgebung durch Oberflächenkräfte gesteuert wird;
- sind häufig funktionell und hierarchisch aufgebaut. D. h. sie setzen sich aus Einheiten zusammen, die funktionell definierbare Teilsysteme bilden. Ein Beispiel hierfür sind Sehnen, deren Zergliedern in Unter-einheiten immer weiter möglich ist, bis hin zum Proteinmolekül. Die Eigenschaften der einzelnen Bündel machen in der Summe die „Mechanik des Materials“ aus. Ein anderes Beispiel ist Holz,⁹ bei dem die Hierarchien von der Nanostruktur (Polymerketten) über Mikro- und Makrofibrillen mit unterschiedlicher Zellwandstruktur bis hin zum Baum geht;
 - bestehen oft hochspeziell aus Mehrschichten (Polylayern). Im Ergebnis von Schichtungsprozessen überkreuzen sich die Vorzugsrichtungen dieser Schichten, so dass sich ein anisotropes Material ergeben kann, obwohl die Einzelschichten isotrop sind (z. B. Kutikula der Insekten);
 - weisen häufig eine funktionelle Kompartimentierung¹⁰ auf. Ein Beispiel hierfür ist die funktionelle Einheit „Venenwand“, welche aus unterschiedlichen Materialien besteht, wie Abschlussmaterialien, elastische Materialien, solche die sich kontrahieren können;
 - bilden häufig unkonventionelle Sandwich-Bauweisen aus. Beispielsweise sind Vogelschädel äußerst leicht; sie bestehen aus einer schwammartigen Knochensubstanz zwischen zwei Deckmembranen, die als „Sandwich“ bezeichnet werden kann;
 - werden auch aus chemisch identischen, physikalisch jedoch unterschiedlichen Komponenten ausgebildet. Wesentlich ist hier, dass auch gegenläufige Eigenschaften mit einem Material ausgebildet werden können. Als Beispiel lassen sich hier Seeigelzähne nennen, die Härte und Elastizität gleichzeitig – als einander widersprechende Eigenschaften – dadurch bekommen, dass zwei chemisch identische Kalkmodifikationen (Calciumcarbonat) ineinander greifen, von denen die eine druckfest, die andere eher zugfest ist. Solche Komposite mit gegenläufigen Materialeigenschaften sind aus technischer Sicht gesuchte Kombinationen;
 - sind sehr häufig ultraleicht. Ein Beispiel für ein „leichtes Tragwerk“ sind die Schmetterlingsschuppen, wo das Chitin¹¹ zu graziösen und extrem leichten Spantenkonstruktionen¹² ausgeformt ist;

⁹ Holz kann als natürlicher, polymerer, faserverstärkter Verbundwerkstoff betrachtet werden.

¹⁰ Kompartimente sind abgeschlossene Bereiche, in denen Reaktionen ungestört ablaufen können.

¹¹ Chitin kann „als der häufigste nachwachsende Rohstoff der Tiere“ bezeichnet werden (Heydemann 2004, S. 30). Etwa 80 Prozent aller Organismen-Arten haben als äußeres und inneres Gerüst-Element den Stoff „Chitin“, einen wasserunlöslichen Zucker, eingebaut. Chemisch ist Chitin ein Polysaccharid bestehend aus den Elementen Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff.

¹² Die Spantenkonstruktion lässt sich auch beschreiben als „ein submikroskopisches Fachwerk von Pfeilern und „Zick-Zack-Dächern“, aufgebaut auf einer Tragemembran. Diese „Dächer“ kombinieren Stabilität mit der Fähigkeit, Schillerfarben zu erzeugen – bei geringem Bauaufwand und hoher Komplexität im Detail und mit geringem Gewicht (Nachtigall 1997, S. 77).

- sind manchmal selbstreparabel. Bekannte Beispiele sind das Zusammenwachsen von Knochen nach einem Bruch oder das Ausheilen von Baumrindenverletzungen;
- sind oft multifunktionell. Ein Beispiel ist das Ei der Schmeißfliege, dessen Chitinwand einerseits wasserundurchlässig ist, andererseits jedoch Wasserdampf durchlässt. Ein anderes Beispiel ist das der Schmetterlingsschuppe als Kombination von „Fachwerkbau“ (statisch vorteilhaft), Entstehung physikalischer Schillerfarben (verhaltensbiologisch vorteilhaft) und oberflächenrauer Flügel (flugbiologisch vorteilhaft). Alle drei Aspekte werden mit ein und derselben Strukturierung bedient (Nachtigall 1997, S. 77). Ein anderes Beispiel sind optische Sensoren, die gleichzeitig als Wärmetauscher fungieren (Auge der Libelle) (UMSICHT 2005, S. 101);
- besitzen häufig adaptive Fähigkeiten. An Stellen starker Belastungen und hoher Spannungen wird Material angereichert, während an schwächer belasteten Stellen ein Materialabbau erfolgt (Bsp. Bäume; Mattheck 2003);
- weisen in der Regel eine terminierte Lebensdauer auf. Sie sind prinzipiell biologisch abbau- und damit recycelbar. Neben dem Problem der nachhaltigen Abfallvermeidung¹³ wird aus bionischer Sicht auch über die „unnötige Haltbarkeit zivilisatorisch-kultureller Gebilde“ (wie z. B. Häuser)¹⁴ diskutiert.

Welche Eigenschaften machen nun biologische Materialien so interessant für die Materialforschung? Hier ist eine Reihe von Eigenschaften aufzulisten: Biologische Materialien sind ressourceneffizient gestaltet. Sie zeichnen sich somit durch eine hohe Stabilität und Funktionalität bei verhältnismäßig geringem Materialeinsatz aus – was u. a. im Leichtbau eine Rolle spielt. Die eingesetzten Grund- bzw. Rohstoffe sind zudem in der Regel bequem aus der Umgebung beschaffbar (Opportunitätsprinzip in der Materialauswahl) bzw. leicht herstellbar – die konsequente Umsetzung dieses Prinzips würde die Kosten der Rohstoffbeschaffung vermindern. In der Natur finden sich keine Hochleistungswerkstoffe, sondern eher einfache Materialien mit einer effizienten inneren Struktur, die auf die jeweilige biologische Konstruktion perfekt abgestimmt ist und so aus technischer Sicht z. B. erstaunliche mechanische Eigenschaften erzielt. Verwendet werden Universalbaustoffe wie Zellulose, Chitin oder Keratin, in Kombination mit relativ wenig anderen Materialien (z. B. anorganische Materialien wie Kalk und Silikate). Das Ergebnis sind oftmals streng funktionell, hierarchisch auf-

¹³ Zerfall des zeitlich terminierten Materials („Die Natur kennt keinen Abfall.“) (Nachtigall 1997, S. 32), der im Wesentlichen an organisch-chemische Reaktionen gebunden ist (Bakterien, Pilze), um die Substanzen wieder für Ausgangsprozesse zur Verfügung zu stellen (Kreislaufprinzip).

¹⁴ Hinter diesem Punkt steht u. a. die Überlegung, die Lebensdauer von Baukonstruktionen auf deren durchschnittlich zu erwartende Lebenszeit auszulegen – ein Prinzip, das in der Natur üblich ist. Damit wird die lange Haltbarkeit technischer Errungenschaften (stabile Konstruktionen etc.) unter dem Gesichtspunkt von Material- und Energieinsparungen in Frage gestellt (Nachtigall 1997, S. 31).

gebaute Werkstoffe. Die Verwendung chemisch einfacher Grundbausteine könnte z. B. den Aufwand für Materiallogistik reduzieren (nach UMSICHT 2005, S. 108/109; Küppers/Tributsch 2002, S. 68).

Die Fähigkeit zum hierarchisch strukturierten Aufbau von Materialien ist im natürlichen Wachstum begründet. Das Bottom-up-Prinzip ist in der Natur konsequent umgesetzt – natürliche Systeme werden aus einzelnen Molekülen aufgebaut und gestalten sich sukzessive (bottom-up). In der belebten Natur ist es möglich, den inneren Aufbau sowie die Strukturierung von Grenz- und Oberflächen bis hinunter zur Nanoskala besser zu kontrollieren, als es heutige Werkstofftechnologien bei synthetischen Materialien ermöglichen. Dieser Gestaltungswunsch besteht jedoch in den Materialwissenschaften schon länger, und er wurde durch Forschungen im Bereich des Einsatzes von Nanotechnologien weiter verstärkt.

Zudem haben biologische Materialien (z. B. bei Tieren) oftmals die Fähigkeit, Struktur und Form zeitnah anzupassen. Biologische Systeme sind insgesamt dynamischer angelegt, d.h. sie befinden sich permanent im Auf-, Um- und Abbau (Kreislaufprinzip) unter permanenter Anpassung an sich verändernde Umweltbedingungen. Dieser Anpassungsprozess erfolgt direkt durch das Material, ohne dass es durch ein zentrales Nervensystem ausgelöst oder gesteuert wird (UMSICHT 2005, S. 100). In den Werkstoffwissenschaften werden solche Materialien als „Smart Materials“ bezeichnet. An diesen wird bereits länger geforscht; sie gelten zudem als herausgehoben innovativ, auch wenn konkrete Anwendungen zumeist noch in frühen Forschungsstadien sind. Die Natur bietet eine Vielzahl intelligenter Materialien, die sich insbesondere dadurch auszeichnen, dass sie mit einer hohen Sensitivität auf Veränderungen der Umwelt reagieren können. Dabei erfolgen Sensorik und Aktorik bis auf die molekulare Ebene und bieten daher erhebliches Potenzial für Miniaturisierung und Systemintegration. Interessant für die Materialforschung sind auch Materialien mit veränderbaren Variablen, die das mechanische Verhalten des synthetischen Stoffes verändern können. So könnten z. B. mit technischen keramischen Materialien neue Eigenschaftskombinationen erreicht werden, z. B. bei gegebener spezifischer Bruchbeanspruchung eine günstige Zähigkeit. Anwendbar wären solche Aspekte auch auf synthetische Polymerfasern, Metallkomposite, strukturelle Komposite auf Textilbasis sowie auf Fragen des Werkstoffversagens (z. B. lokales Stoppen von Bruchspalten) (Nachtigall 2002, S. 58).

Ziele, unter denen von der Natur gelernt werden soll, sind in Bezug auf Materialien und Werkstoffe analog dem in Kapitel II.3 ausgeführten „Doppelverhältnis“ der Bionik zu definieren – einerseits mit einer „technischen Brille“ auf die Natur zu schauen und Lösungsoptionen zu abstrahieren und andererseits orientiert an dem auch im Materialienbereich vorhandenem Erfordernis, mit konventionellen Materialien oft vorhandene Konflikte zwischen Natur und Technik – zumindest partiell – aufzulösen (Recycling etc.). Dennoch lässt sich festhalten, dass die heutige Material- und Werkstoffforschung sich langsam (in immer

kleiner werdenden Schritten) an Grenzen annähert (z. B. Wirkungsgradgrenzen bei der Energieumwandlung). Dabei nimmt der Aufwand forschungs-, material- und kostenseitig im Verhältnis zum Ergebnis (z. B. Wirkungsgradverbesserung) für relativ „kleine Schritte“ immer weiter zu. Hier kommt innovativen materialtechnischen Entwicklungen – in der Hoffnung auf „Durchbrüche“ – eine entscheidende Bedeutung zu.

Die Antriebskräfte für „biologische“ Materialentwicklungen sind durchaus vergleichbar mit denen für klassische Materialien – Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes bei gleichzeitiger Optimierung von Funktionalitäten (z. B. für Nahrungssuche, Energieaufnahme, Fortbewegung). Biologische Lösungen stellen gemäß den verfügbaren Umgebungsbedingungen ein Optimum dar. Im Unterschied zur technischen Entwicklung (die meist im Top-down-Modus funktioniert) werden in der Natur Bottom-up-Ansätze favorisiert, die bisher in keinem technischen Modell abbildbare, multikriterielle Optimierungsprobleme darstellen. Im Unterschied zu den Werkstoffwissenschaften ist die Evolution bei der Materialsuche eher „zukunftsblind“, das Optimieren erfolgt nicht vorausschauend, sondern konsequent nach strengen Auslesekriterien –, und vor allem nimmt sich die Natur Zeit. Auch wenn in der Bionik versucht wird, durch Ausnutzung „natürlicher“ Erfahrungen eher Zeit einzusparen, kommt es doch oft darauf an, eine Vielzahl von Details zu erfassen und ggf. miteinander zu kombinieren, um die gewünschte Wirkung zu erzielen. Daran schließt sich u. a. die Frage an, nach welchen Kriterien biologische Materialien mit herkömmlichen, etablierten Materialien und Werkstoffen (in Eigenschaften, Herstellung und Einsatz) verglichen werden können bzw. sollten.

2. Stand der Forschung

Die Forschung in der Material- und Werkstoffbionik erfolgt parallel an heterogenen Einzelthemen. Eine gängige Segmentierung, wie in den „klassischen Werkstoffwissenschaften“ vertraut, ist hier eher nicht vorhanden. Da „Material und Konstruktion“ thematisch zusammengehören, ist das Materialenthema auch in verwandten Themen wie etwa der Konstruktionsbionik präsent, was eine systematische Darstellung erschwert. Im Folgenden soll der Stand der Forschung anhand ausgewählter Beispielfelder charakterisiert werden.

2.1 Bibliometrische Analyse

Die aktuelle Bedeutung der Materialforschung lässt sich exemplarisch anhand von Veröffentlichungen belegen. Von den in die Literaturdatenbank „SciFinder“ recherchierten 7 109 Einträgen zu Biomimetik bzw. Bionik, beschäftigt sich der größte Teil mit neuen Materialien, insbesondere deren Herstellungsmöglichkeiten.¹⁵ Eine Verkleinerung der Trefferzahl durch Extraktion derjeni-

¹⁵ Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist beispielsweise die Mineralisation in Anwesenheit einer organischen Matrix, die das Wachstum und die sich ausbildende Morphologie steuert (UMSICHT 2005, S. 107).

gen, die den Begriff „Materialien“ enthalten (1 553 Treffer) und eine anschließende Auswertung nach dem Publikationsjahr ergibt die in Abbildung 3 dargestellte zeitliche Entwicklung zur Publikationshäufigkeit in der bionischen bzw. biomimetischen Materialwissenschaft (UMSICHT 2005, S. 106/107).

Es kann festgestellt werden, dass bionische bzw. biomimetische Materialien ein noch junges Forschungsfeld darstellen, das sich etwa seit Mitte der 1990er Jahre rasant entwickelt hat. Eine inhaltliche Analyse der Einträge macht jedoch deutlich, dass es zunächst vor allem um das Verständnis biologischer Materialbildungs- und -umwandlungsprozesse geht, deren technische Anwendung bislang aber kaum eine Rolle spielt. Letztendlich wird das Ziel der Bionik, verwertbare technische Lösungen bereitzustellen, in den wissenschaftlichen Publikationen kaum angesprochen (UMSICHT 2005, S. 107).

Die Werkstoffwissenschaften wurden in der Vergangenheit von unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen – oft getrennt voneinander – bearbeitet. Für moderne Werkstoffentwicklung ist ein enormer Bedarf an Interdisziplinarität zu verzeichnen: Ohne die Zusammenarbeit von Experten aus Verfahrenstechnik, Medizin, Biologie, Informatik, Chemie, Physik und Materialwissenschaft lassen sich keine neuen Materialien mehr entwickeln. Der interdisziplinäre Ansatz der Bionik entspricht einem Faktum, das auch in anderen Bereichen wie etwa der Nanotechnologie gerne als „Markenzeichen“ verwendet wird, aber keine Exklusivität besitzt.

Die Begriffe bionische bzw. biomimetische Materialien werden oft synonym nebeneinander verwendet und wurden daher auch zusammen recherchiert. Im Folgenden soll vereinfachend von bionischen Materialien bzw. Werkstoffen gesprochen werden.

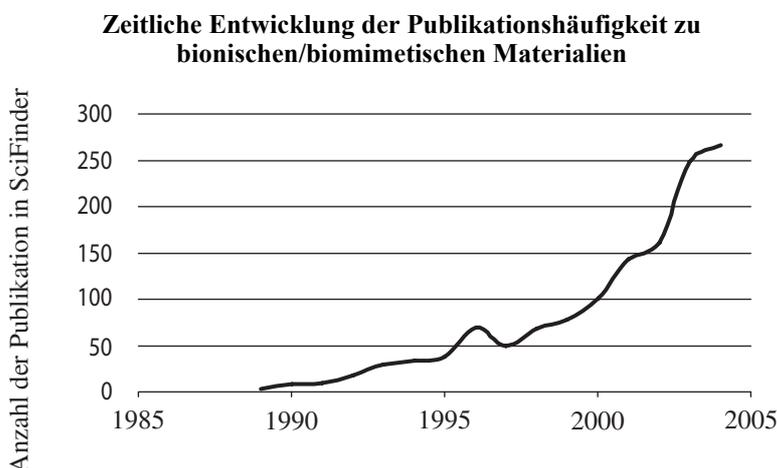
2.2 Forschungsgegenstand und Akteure

Forschungsbereiche, die derzeit vorrangig bearbeitet werden, lassen sich wie folgt beschreiben, auch wenn in der Regel von den Forschungsgruppen in Deutschland mehrere unterschiedliche Themenstellungen abgedeckt werden (UMSICHT 2005, S. 108):

- Bei der direkten Nachbildung/Synthese natürlicher Materialien werden Biomaterialien verwendet als
 - Ideengeber, wobei die bionische Lösung darauf abzielt, natürliche Materialien zu gewinnen und z. B. als Biopolymer unmittelbar für technische Lösungen zu nutzen (Seidenraupe). Dazu zählt auch die Synthese biologischer Materialien durch Nachbildung und Komposition ihrer chemischen Komponenten;
 - Templates¹⁶ für Materialsynthesen (z. B. für die Biomineralisation von Nanopartikeln, die Synthetisierung perlmuttähnlicher Strukturen oder Nutzung von pflanzlichen Strukturen als Kohlenstoffpreforms (Vorformen) für zelluläres Siliziumcarbid (SiC)).
- Bei der Nachbildung natürlicher Materialstrukturen geht es auch um die Nutzung von Materialmorphologien und Bauteilformen zur Übertragung physikalischer Mechanismen und Effekte auf technische Werkstoffe:
 - Grenzflächeneffekte (z. B. Selbstreinigung (Lotus-Effekt), tribologische Schichten (Sandfisch), Strömungsbeeinflussung, Antifouling);

¹⁶ Der Begriff Template (aus dem engl. für Kopierschablone, Vorlage) wird im Materialbereich für chemische (meist organische) Verbindungen verwendet, die selbstorganisiert die Bildung gewünschter makromolekularer Strukturen umsetzen können.

Abbildung 3



Quelle: UMSICHT 2005, S. 107

- Materialstruktureffekte (z. B. pflanzliche Achsen für Textilien,¹⁷ Membranen, Bauteile, Faserverbundwerkstoffe);
- modellgestützte Formoptimierung.¹⁸

Als wichtige Netzwerke in Bezug auf bionische Materialforschung und -entwicklung sind in Deutschland zu nennen: die Fachgruppe „Leichtbau, Materialien“ innerhalb des Kompetenznetzes „BIOKON“ und innerhalb des Kompetenznetzes „Biomimetik“ das Netzwerk „Pflanzen als Ideengeber für die Entwicklung biomimetischer Mate-

¹⁷ Hierbei geht es um die Entwicklung von technischen Textilien, die einen Flüssigkeitstransport – basierend auf Wasserleitstrukturen von Holzpflanzen – zulassen. Potenzielle Anwendungsbeispiele sind Schutzbekleidungssysteme mit ausreichendem Schweißtransport, Brennstoffzellen-Vliese, Windeln, Polsterbezüge für Automobilsitze (Biomimetik 2006).

¹⁸ Nach biologischen Designregeln entwickelte Konstruktions- und Optimierungsoftware CAO (Computer Aided Optimization), SKO (Soft Kill Options) und CAIO (Computer Aided Internal Optimization).

rialien und Technologien“ (zu den Netzwerken s. Kap. III.2.5). Universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, die im Bereich bionikbasierte Materialien und Werkstoffe tätig sind, sind in Anhang 8 aufgeführt. Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Nachfolgend sind Förderstellen und Förderprogramme bzw. thematische Schwerpunkte aufgeführt (Tab. 5), die für die Finanzierung bionischer Werkstoffentwicklungen genutzt werden können. Es sind dies sowohl Förderprogramme, die explizit bionische Materialprojekte als Fördergegenstand nennen, als auch solche, die aufgrund ihrer allgemeinen Zielsetzung für die Förderung bionischer Werkstoffentwicklungen in Betracht kommen (UMSICHT 2005).

Zu erkennen ist, dass im Materialbereich eine umfassende Förderung besteht, deren Ergebnisse und thematischen Förderschwerpunkte im Detail (Art der Werkstoffe und Materialien etc.) noch auszuwerten wäre.

Tabelle 5

Förderprogramme zu neuen Materialien

Förderung	Projekträger	Gegenstand/Thema	Volumen	wann
VW-Stiftung		diverse thematische Schwerpunkte: z. B. „Komplexe Materialien: Verbundprojekte der Natur-, Ingenieur- und Biowissenschaften“	k. A.	seit 2000
BMBF	Projekträger Jülich, Außenstelle Berlin	Ideenwettbewerb/Machbarkeitsstudien „Bionik – Innovationen aus der Natur“	1 Mio. Euro	2003
BMBF		Rahmenprogramm: Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft (WING)	250 Mio.	seit 2003
BMBF	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Bonn – PT Umweltforschung und -technik	„Innovationen als Schlüssel für Nachhaltigkeit in der Wirtschaft“ Förderschwerpunkt: neuartige Konstruktionsprinzipien von Bauteilen oder Geräten (u. a. nach bionischen Konzepten bzw. Vorbildern aus der Natur)	insgesamt 70 Mio. Euro für die gesamte Periode	2004–2005
EU		neue nanotechnologische Verfahren nach dem Vorbild der Natur – STREP	ca. 6 Mio. Euro	2004–2005
BMBF	Projekträger Jülich, Außenstelle Berlin	Ideenwettbewerb/Machbarkeitsstudien „Bionik – Innovationen aus der Natur“ im Rahmenprogramm „Biotechnologie – Chancen nutzen und gestalten“	1 Mio. Euro	2006–2007

Quelle: UMSICHT 2005

2.3 Ausgewählte Forschungsfelder

Die Material- und Werkstoffforschung taucht in der Bionik in verschiedenen Facetten auf – entweder direkt als solche gekennzeichnet oder „untergeordnet“ in übergreifenden Forschungsgebieten (z. B. Perlmutter als Werkstoff in der marinen Bionik, wo eher der Bezug zum Meer als Ideenquelle im Vordergrund steht).

Beispiel Biokeramik

Die bereits in Kapitel II aufgezeigten Abgrenzungsprobleme zwischen „klassischer“ und „neuer“ Bionik sollen hier materialbezogen am Beispiel des mittlerweile weit gefächerten Feldes der Biokeramik verdeutlicht werden. Technische Keramik und Biologie hatten bis vor nicht allzu langer Zeit wenig miteinander zu tun. Das Kristalline der Keramik mit ihren extrem lebensfeindlichen Herstellungsbedingungen (Temperaturen über 1 000 °C) war eher ein extremer Gegensatz zum Biologischen und Lebendigen. Mittlerweile repräsentiert die „Biokeramik“ einen hochdynamischen, äußerst vielversprechenden Zweig der keramikorientierten Materialwissenschaften mit teilweise starkem bionischem Einfluss sowie explizitem Rückgriff auf Vokabeln wie „biogene Keramik“, „Biominalisation“ und „biomimetische Materialsynthese“ (IÖW/GL 2005, S. 13 f.).

Die Begriffsverwirrung war in diesem Bereich so groß geworden, dass Grathwohl – ein international renommierter Akteur in diesem Bereich – kürzlich den Versuch einer Begriffsklärung und Zuordnung der verschiedenen Bereiche der Biokeramik vorgelegt hat, an den sich die verschiedenen Akteure (zumindest im deutschsprachigen Raum) zunehmend zu halten scheinen (Grathwohl 2004, S. 16 ff.). Diese Darstellung verschafft zugleich auch einen ersten Eindruck von aktuellen Gebieten der „Material- oder Werkstoffbionik“ bzw. der „biomimetischen Materialsynthese“ (IÖW/GL 2005, S. 13 f.):

- Biofunktionale Keramiken sollten Keramiken in der Endoprothetik genannt werden (z. B. Implantate von bzw. in Zähnen, Knochen), wenn der Herstellungsprozess dieser Prothesematerialien nicht nach biologischem Vorbild erfolgt, sondern das Material nur eine „biologische Funktion“ erfüllt und ggf. noch in eine biologische Gestalt gebracht wurde. Das Ganze hat dann mit Bionik recht wenig zu tun.¹⁹
- Biogene Keramiken sollten diejenigen Keramiken genannt werden, die von Organismen selbst (durch Biominalisation (vgl. DFG 2005) für ihren Schutz bzw. für Stützfunktionen aufgebaut werden, also Muschel-

und Schnecken-schalen, die Skelette von Kiesel-schwämmen oder von Wirbeltieren. Die Erforschung von Struktur, Funktion und Genese dieser Schalen und Skelette gehört zur (Technischen) Biologie, soweit sie (noch) nicht auf die Lösung gesellschaftlich technischer Probleme ausgerichtet ist. Diese Forschungen liefern aber oft äußerst wertvolle Grundlagen für bionische Forschungen und Entwicklungen (s. a. Ausführungen zu Perlmutter als Bsp. für biogene Keramiken).

- Biomorphe Keramiken sollten Keramiken genannt werden, bei deren Herstellungsprozess biologische Strukturen formgebend wirken.²⁰ So wird z. B. derzeit in einer interessanten Entwicklungslinie Holz zunächst verkohlt (karbonisiert). Die dabei entstehenden Karbonstrukturen erhalten das zelluläre Gefüge von Holz weitgehend. Sie werden anschließend mit Kieselsäure getränkt, wobei die Kieselsäure dann auch mit dem Kohlenstoff eine Verbindung eingehen kann (woraus dann Siliziumkarbid entsteht).²¹ Die Frage, ob diese Vorgehensweise bionisch ist oder nicht, ist nicht ohne weiteres zu beantworten. Dagegen spricht die Tatsache, dass die materielle Umsetzung überhaupt nicht bionisch ist. Die natürlichen Strukturen dienen nur als formbildende Matrizen für einen Prozess und ein Material ohne biologisches Vorbild. Andererseits wird jedoch durchaus auf das zelluläre „Struktureregebnis“ eines evolutionären Optimierungsprozesses mit Blick auf die Stabilität von Bäumen zurückgegriffen.
- Biomimetische Keramik sollten dagegen Keramiken genannt werden, deren Herstellungsprozess (Biominalisation) und Ergebnis biologischen Vorbildern folgt.²² Die von der wissenschaftlichen Aufklärung der Biominalisation profitierende Template-gesteuerte Herstellung von „biomimetischer Keramik“ setzt auf Selbstorganisationsprozesse im nanoskaligen Bereich (biomimetische Materialsynthese).²³ Die von der Universität Bremen derzeit in mehreren Projekten verfolgte Herstellung von künstlichem Perlmutter für verschiedene Einsatzgebiete in der Oberflächentechnik gehört hierher und das Projekt eindeutig zur Bionik (Universität Bremen 2005).

¹⁹ Ein Problem dieses Vorschlags liegt allerdings darin, dass der Begriff biofunktional in der Endoprothetik auch als Steigerungsförm von biokompatibel gebraucht wird. Als biofunktional werden dabei Oberflächen bezeichnet, die nicht nur keine toxische oder Immunreaktion hervorrufen (das wäre dann Biokompatibilität), sondern die z. B. in der Lage sind die Proteinexpression oder das Zellwachstum zu unterstützen bzw. zu verbessern. Letzteres kann durch Nanostrukturierung und dabei auch durch Trägerfunktion für bestimmte Stoffe geschehen (vgl. z. B. Aachener Kompetenzzentrum (2005, S. 580), und VDI-TZ (2004a, S. 117).

²⁰ Hier taucht das Problem auf, dass wichtige Akteure auf diesem Feld bisher hier mit dem Begriff der »biogenen Keramiken« gearbeitet haben (insbesondere am Fraunhofer IKTS in Dresden; vgl. IKTS 2006). Es sieht allerdings danach aus, dass sich das in jüngster Zeit ändert (vgl. Hoppe 2000; IKTS 2004 sowie die Arbeitsgruppe um Prof. Greil an der Universität Erlangen-Nürnberg). Letztere verwendete für dieses Vorgehen allerdings (ebenfalls wie die EMPA in der Schweiz) oft den Begriff der Biomimetik, der für dieses Verfahren (ohne echten Template-gesteuerten Selbstorganisationsprozess) nicht angewendet werden sollte.

²¹ Vgl. zu Details z. B. die Arbeiten der in der vorigen Anmerkung angesprochenen Arbeitsgruppen.

²² Der Begriff „biomimetische Keramik“ wird bisher nicht verwendet, allerdings die Begriffe „biomimetische Werkstoffe“ und »biomimetische Knochen« schon (Europäisches Industriemuseum 2005). Das Herstellungsverfahren wird allerdings „biomimetische Materialsynthese“ genannt (Pompe et al. 1999, Pompe 2004).

²³ Vgl. für einen ersten Überblick Greil (2002) sowie die Ausschreibung „Biomimetische Werkstoffe“ im Rahmen des Programms „Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts MaTech“ des BMBF (2000).

- Biocere schließlich sind Verbundeinheiten aus einer „biofunktionstüchtigen“ (lebenden) biologischen und einer anorganischen Komponente (wobei das dabei zugrunde gelegte Prinzip der Immobilisierung in der Bioverfahrenstechnik schon eine lange Tradition hat). Neu ist hier die Herstellung eines keramisch-biologischen Verbundmaterials mit „bioaktiven“ Komponenten – was nur mit Sol-Gel-Verfahren möglich ist. Die biologische Komponente kann dabei von der molekularen Ebene (z. B. Zellwandproteine, Enzyme, DNA) bis zu lebenden Bakterien oder Pilzen reichen. Wenn es bloß um eine besonders intelligente „Nutzung von Organismen und deren Funktionseinheiten“ geht, handelt es sich um Biotechnologie und nicht um Bionik. Wenn es aber um mehr geht als um Immobilisierung und Behausung, wird es schon schwieriger: Wie wird z. B. der interaktive Verbund zwischen einem Computerchip und einer Nervenzelle genannt? Bereits die Bio-keramik, als das Zusammenwachsen von Keramik und Biologie könnte man im Sinne von „converging technologies“ interpretieren. Spätestens mit dem interaktiven Verbund von Computerchip und Nervenzelle (Kap. V.2) aber sind wir vollständig in diesem Bereich angekommen (der sehr viel mit Bionik zu tun haben kann).

Beispiel Perlmutter

Perlmutter ist Gegenstand der Forschung, weil es sich durch eine hohe Härte und gleichzeitig hohe Bruchfestigkeit auszeichnet (Nachtigall 2002). So hat Perlmutter, obwohl zu 97 Prozent aus Kalk bestehend, eine tausendfach höhere Bruchfestigkeit als dieser (MPG 2005). Perlmutter – also die innere Schicht von Molluskenschalen (z. B. Seeohrschnecken) – ist ein Verbundwerkstoff (bzw. Kompositwerkstoff), der durch Biomineralisation entstanden ist. Er besteht aus einer regelmäßigen Anordnung von etwa 500 nm dünnen Plättchen aus Aragonit (Kristallform von Calciumcarbonat). Zwischen den Plättchen befindet sich eine etwa 40 nm dicke organische Schicht (organisches Biopolymer), die die Plättchen quasi miteinander verkittet. Obwohl diese organische Schicht nur etwa einen Anteil von 3 Prozent am Gesamtgewicht hat, ist sie entscheidend für die Materialeigenschaften des Perlmutter (Universität Bremen 2006a). Denn dieser Verbundwerkstoff besitzt mechanische Eigenschaften, die die Eigenschaften der einzelnen Komponenten weit übertreffen. Zudem ist das Material korrosionsresistent gegenüber Seewasser.

Perlmutterchalen und -gehäuse werden von Muscheln und Schnecken als Biomineral zum Zwecke des Fraßschutzes aufgebaut. Aus dem überreichen Kalkangebot der Meere kristallisieren sie diese biogene Keramik mit einem hochgeordneten nanoskaligen Gefüge, wie es technisch bisher nicht realisierbar war (Universität Bremen 2006b). Perlmutter ist u. a. zäher als heutige Industriekeramik. Die aus dem Verständnis dieses Prozesses der Biomineralisation abgeleiteten Strukturregeln werden für die Entwicklung hochzäher Keramiken in Form von Folien, Membranen, Gerüststrukturen und hochtexturierten Beschichtungen genutzt.

Mögliche Einsatzgebiete werden auch im Bereich der Medizintechnik (Implantatwerkstoffe) gesehen, da heute verwendete nicht keramische Werkstoffe oft problematisch bezüglich ihrer Biokompatibilität sind. Ihre Bevorzugung gegenüber Keramik liegt in der eingeschränkten Zuverlässigkeit spröder Werkstoffe (wie Keramik) begründet. Für die großtechnische Umsetzung perlmuttmähnlicher Keramikstrukturen wird für Bauteile eine hohe Schadenstoleranz angestrebt, wobei stoffliche Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit unter physiologischen Gesichtspunkten noch zu optimieren sind (Universität Bremen 2006b). Vielversprechend sind auch Perlmutterwandfarben als hochtexturierte, abschiefernde (Verlust-)Beschichtungen für Einsatzbereiche im Fassadenschutz (Antigraffiti) und im Schiffbau (Antifouling). Um auf der Basis der naturwissenschaftlichen Aufklärung molekularbiologischer Prinzipien der Perlmutterbildung in der Schnecke zu technischen Lösungen zu kommen, muss die Grundlagenforschung zur Biomineralisation allerdings noch eine gewisse Reife erlangen.

Beispiel smart materials

Ein interessantes Themenfeld ist das der „intelligenten“ Materialien. In der Natur haben sich Strukturen herausgebildet, die sich an verändernde Umweltbedingungen anpassen können. Solche Materialien werden „smart materials“ oder auch „adaptive Werkstoffe“ genannt.

Selbstreparatur – also Wundheilung – ist solch ein typisches, anpassendes Merkmal aller Lebewesen. Sie tritt in verschiedenen Ausprägungen bei allen Pflanzen und Tieren auf. Beispiele sind die Narbenbildung in der Haut, Kallusbildungen bei Bäumen²⁴ und Reparaturvorgänge bei krautigen Pflanzen. So hat man bei Lianen beobachtet (und bei Bohnenpflanzen verifiziert), dass bei einer Verletzung (z. B. zu $\frac{2}{3}$ durchtrennter Halm) eine schnelle Selbstreparatur einsetzt, die letztendlich zur Wiederherstellung der vollwertigen mechanischen Eigenschaften führt (Biegsamkeit, Tragevermögen).²⁵ Der natürliche Rissverschluss erfolgt zunächst mit Zellen aus dem umliegenden Grundgewebe, indem diese in den Riss hineinquellen. Ein anschließend einsetzendes zusätzliches Zellwachstum führt zu einem „Wundverschluss“. Sobald diese Zellen „verholzen“, ist die frühere Flexibilität der Pflanze (Mechanik) nachweisbar wiederhergestellt. Die Untersuchungsergebnisse legen nahe, dass in der frühen Phase der Selbstreparatur bei Lianen und krautigen Pflanzen überwiegend physikalisch-chemische Prozesse invol-

²⁴ Über die Baummechanik, variable Steifigkeiten etc. existiert eine umfangreiche Literatur (u. a. Mattheck 2003).

²⁵ Dies stellt hier – mit Bezug zum Kapitel II – exemplarisch den ersten Schritt bionischen Lernens dar: das Erkennen und Nachvollziehen des Naturvorgangs. Im zweiten Schritt muss dann ein Modell entwickelt werden (z. B. ein prinzipielles Funktionsmodell für selbstreparierende Membranen). Im dritten Schritt erfolgt dann die praktische Umsetzung in verschiedenen Stufen (z. B. beginnend mit einem Pilotmodell einer beschichteten Membran mit Polyurethan-Schaum, unter Überdruck ausgehärtet, der Löcher bis zu 5 mm faktisch abdichtet, so dass der Luftaustritt um 2 bis 3 Größenordnungen verlangsamt wird – im Vergleich zu „ohne Verschluss“). Zukünftig geht es, neben der weiteren Optimierung des Verschlussverfahrens, um die Wiederherstellung der mechanischen Eigenschaften der Membranen (Speck et al. 2006).

viert sind, was für eine Umsetzung in technische Produkte von Vorteil ist. Derzeit werden aufbauend auf diesem Prinzip selbstreparierende Membranen für technische Anwendungen entwickelt. Erste Erfolge gibt es für „Verletzungen“ in pneumatischen Strukturen. Zukünftig soll dieses Konzept für alle weichen Strukturen einsetzbar sein (Speck et al. 2006).

Ein anderer „anpassender“ Ansatz ist das in vielen biologischen Strukturen zu findende Zusammenspiel von Sensor, Steuereinheit und Aktuator. Beispielsweise verfügt die menschliche Hand über einen Tastsinn, das Gehirn verarbeitet die Information dieser Drucksensoren und setzt diese in Steuersignale für die Aktuatoren (z. B. Hand- und Armmuskeln) um. Ein relativ neues Ziel technischer Entwicklung sind daher Materialien, die sich – ebenfalls mit Sensoren, Aktuatoren und Steuerungen ausgestattet – ähnlich wie biologische Systeme „verhalten“ und daher an veränderte Umgebungsbedingungen anpassen können. Beispiele sind hier Entwicklungen im Bereich der Biomechatronik – etwa biologisch inspiriertes Laufen (Buehler et al. 2006) oder bionisch inspirierte Roboterarme (Klug et al. 2006).

Das „Prinzip der Selbstorganisation“ ist in der Natur weit verbreitet. Die in diesem Zusammenhang verwendeten Bezeichnungen wie „adaptiv“ und „Selbstheilung“ sind nicht bionikspezifisch, sie werden z. B. auch im Zusammenhang mit dem Einsatz von Nanotechnologien verwendet. Das Themenfeld „Nanobionik“ wird in Kapitel V.1 behandelt.

Von den anpassungsfähigen Materialien wird ein hohes Potenzial für technische Anwendungen erwartet. Inzwischen gibt es neben den oben genannten eine Reihe von Entwicklungen, z. B. Materialien die den Piezoeffekt nutzen²⁶ (Analogie: Nervenimpulse) und bei entsprechender Ansteuerung als Vibrationsdämpfer²⁷ bei Fahrzeugen ein-

²⁶ So zeigen Knochen beim Biegen lokale piezoelektrische Effekte, welche bei der Ausheilung von Brüchen eine Rolle spielen (Nachtigall 2002, S. 86).

²⁷ Gemeint sind hier multifunktionale Verbundwerkstoffe, die selbständig in der Lage sind, Schwingungen zu dämpfen und den damit verbundenen Lärm zu reduzieren: Sensoren registrieren die Schwingung im Material, das Sensorsignal wird von einem Regler verarbeitet, der integrierte Aktuatoren so ansteuert, dass die Bewegung umgehend abgedämpft wird. Verwendet werden dazu mikrometerfeine piezoelektrische Fasern aus Keramik, die mechanische oder thermische Spannungen in elektrische Signale umsetzen. Wird umgekehrt eine elektrische Ladung angelegt, können die Fasern sich dehnen oder zusammenziehen. Die piezoelektrischen Fasern müssen allerdings sehr dünn sein. Bei einem Durchmesser oberhalb von 30 Mikrometer könnten sie die Eigenschaften des Grundwerkstoffs – etwa Festigkeit und Steifigkeit – nachteilig beeinträchtigen. Der komplette Verbundwerkstoff setzt sich schließlich aus Stapeln aktiver und passiver Einzelschichten zusammen und besitzt sowohl sensorische als auch aktuatorische Eigenschaften. Wird zum Beispiel ein Pkw-Dach aus einem solchen Werkstoff aufgebaut, kann es sehr dünn sein, also den aktuellen Anforderungen nach Leichtbau entsprechen, und trotzdem den Komfort für die Insassen erhöhen, denn es senkt den Lärmpegel im Fahrzeug enorm. Weitere innovative Anwendungen werden diskutiert: Satellitenantennen, die sich im Orbit von selbst nachjustieren oder die Reduzierung der Lärmbelastung von Patienten in bislang noch sehr lauten Magnetresonanz-Untersuchungsgeräten (VDI 2006).

gesetzt werden können, oder auch polymere Gele (Analogie: Gele von Quallenschirmen), die bei Anlage einer elektrischen Spannung Formänderungen ausführen und umhüllende Membranen unter Zugspannung setzen (Bsp. Flossenantriebe). Hintergrund ist hier, dass Polymere als auch Lösemittel auf Veränderungen von Temperatur oder pH-Wert reagieren (Nachtigall 2002). Eingeordnet werden hier auch Materialien, die in der Lage sind, Störungen im eigenen Bereich zu bemerken und anzuzeigen so wie Mechanorezeptoren auf der Haut. Solch ein fein verzweigtes Nervenetz könnte man sich in Form von Lichtleitfasern – nervensystemartig auf die Außenhaut von Flugzeugen aufgebracht – vorstellen, die feine lokale Veränderungen (Mikrorisse etc.) monitorieren (Nachtigall 2002).

Beispiel selbstreinigende, superhydrophobe Oberflächen und Materialien

Bionisch strukturierte Beschichtungen bieten mittlerweile Eigenschaften, die weit über den bekannten Lotus-Effekt – also die Selbstreinigung in Verbindung mit Wasser²⁸ – hinausgehen. So fallen hier auch Antihafbeschichtungen sowie Oberflächen zur Minimierung des Reibungswiderstandes i.w.S. in diese Rubrik, da sie auf veränderten Eigenschaften von Oberflächen – auch solche, die im Zusammenhang mit der „Lotus-Forschung“ gemacht wurden – aufbauen.

Die Idee – selbstreinigende Pflanzenoberflächen im bionischen Sinne auf technische Produkte zu übertragen – ist Anfang der 1990er Jahre von Prof. Wilhelm Barthlott entwickelt worden. Hier geht es um den Lotus-Effekt²⁹, zu dessen Nutzung mittlerweile ca. 200 Patente angemeldet wurden (Andres 2005; Barthlott 2005 u. 2006). Beispiele aus der Praxis sind selbstreinigende Fassadenfarbe, die als erstes Produkt 1999 am Markt eingeführt wurde und heute international vertrieben wird (Lotusan®, Fa. Sto AG), selbstreinigender Putz (Fa. Sto) oder auch selbstreinigende Dachziegel (seit 2004 von der Fa. Erlus Baustoffe AG vertrieben (Bauzentrale 2004). Der Lotus-Effekt wird auch in den Formgebungsprozess von Kunststoffbauteilen integriert (Fa. Degussa), wobei erste Spritzgießteile mit selbstreinigender Oberfläche³⁰ ohne zusätzlichen Verarbeitungsschritt mit PP, POM, ASA,

²⁸ Der auf dem Selbstreinigungsprinzip spezieller Pflanzenblätter basierende Lotus-Effekt stellt eine Kombination superhydrophober und selbstreinigender Oberflächeneffekte dar. Realisiert werden diese Fähigkeiten durch eine spezielle nanostrukturierte Oberfläche in Kombination mit einer darunter liegenden Makrostruktur. Nur so können neben großen Kontaktwinkeln auch niedrige Abrollwinkel (für Wassertropfen) realisiert werden, was für eine vollständige Selbstreinigung ausschlaggebend ist.

²⁹ Ursächlich für den Lotus-Effekt ist, dass die Oberflächenstruktur, die verhindert, dass Pilzsporen auf der Oberfläche haften bleiben, bei der Lotus-Pflanze besonders effektiv ausgeprägt ist (nach Barthlott 2006).

³⁰ Ein Nachteil der momentan herstellbaren Lotus-Effekt-Schichten ist ihre fehlende Oberflächenverschleißfestigkeit. Der selbstreinigende Effekt ist derzeit insoweit temporär, als er beispielsweise auf Kunststoffgeschirr aufgebracht, einen Spülwaschgang nicht aushält (Michel 2006).

PE-HD und PBT³¹ realisiert wurden (KI 2005). Dies lässt eine serientechnische Umsetzung und damit eine breitere Anwendung in naher Zukunft realistischer erscheinen (nach UMSICHT 2005). Weitere Forschungsarbeiten laufen hinsichtlich der Entwicklung eines superhydrophoben, technischen Textil (Cerman et al. 2004).

Ein weiteres bekanntes Beispiel – eher mit Bezug zu Verminderung des Reibungswiderstandes – sind die sog. Riblet-Folien³² für Flugzeuge. Diese bewirken eine veränderte Reibung auf der Außenhaut von Flugzeugen und damit eine Treibstoffersparnis von bis zu 8 Prozent (was bis zu 15 Passagiere mehr pro Flug ermöglichen würde). Allerdings ist die technische Umsetzung bis heute nicht wirklich gelungen (Folie muss manuell aufgeklebt werden), und sie ist nicht reibungsresistent (z. B. bei Reparaturarbeiten am Flugzeug) (Barthlott 2006).

Beispiel Kleben und Haften

Klebstoffe, die blitzschnell aushärten, die an Eis kleben oder solche mit Zementhärtungseigenschaften bis hin zu Hybridklebstoffen zum funktionalen Kleben und Lösen, sowie solche mit hochadhäsivem Klebevermögen unter extremen Umweltbedingungen – hier bieten sich natürliche Klebelösungen für das technische Kleben (Fügen gleicher oder ungleicher Werkstoffe unter Verwendung eines Klebstoffs) an. Die Forderung technischer Anwender etwa nach einem Kleben ohne Vorbehandlung erfüllen einschlägige Naturlösungen seit langem. Zudem sind alle in der Natur verwendeten Klebstoffe umweltverträglich. Exemplarische Anwendungsbereiche sind die Verpackungsindustrie, die Bauindustrie (z. B. Kleben von Bodenbelegen) und der Medizinbereich (Gewebechirurgie, Zahnmedizin, Prothetik) (Nachtigall 2002, S. 89).

In der Klebetechnik gibt es eine Reihe ungelöster Fragestellungen wie das Kleben unter bzw. in Anwesenheit von Wasser, der Einsatz von Klebstoffen in der Medizin (die lebende Gewebe kleben und zudem biokompatibel sind) sowie lösbare Klebeverbindungen. In der Natur existieren Organismen, die derartige Klebesysteme besitzen. Deshalb stellt ein biomimetischer Ansatz für die genannten Fragestellungen eine grundsätzliche Lösungsstrategie dar (IFAM 2006a). Beispielsweise bilden maritime Organismen extrem stabile, adhäsiv vielseitige und in (Salz)Wasser aushärtende Klebesysteme an. Derzeit ist ein sog. „Miesmuschelklebstoff“³³ verfügbar. Durch Verwendung des originären Biomaterials (Gewinnung aus Miesmuscheln) kann der Klebstoff allerdings nicht der Bionik (s. Kap. II) zugeordnet werden, auch wenn diese Proteine sehr gute Hafteigenschaften aufweisen. Der bionische Aspekt käme zum Tragen, wenn der Klebemechanismus auf eine technische Anwendung übertragen werden

könnte. Beispielsweise wird derzeit an Hybridklebstoffen geforscht, die ein „synthetisches Rückgrat“ aufweisen (z. B. aus synthetischen Acrylaten bestehen) und mit Proteinsegmenten modifiziert werden (d.h. nur Verwendung der Segmente, die klebewirksam sind³⁴) (Rischka 2006).

Klebungen sind hier aufgeführt, da sie beispielhaft für einen „Dualismus“³⁵ stehen, der im Zusammenhang mit bionischem Lernen öfter auftaucht: einerseits das Kleben (Verbinden) und andererseits das Lösen, technisch einsetzbar für die Entwicklung von neuen Haft- und Antihafsystemen. Beispielsweise werden in der maritimen Bionik Anhaftungen von Seepocken untersucht, die an maritimen Anlagen unerwünscht ist (Antifouling). Es gibt bis heute aber keinen Klebstoff, der dauerhaft unter Salzwasserbedingungen haftet. Das Verständnis der Adhäsionsmechanismen (z. B. der Seepocke) könnte zum Haften auf glatten Oberflächen genutzt werden, wobei der „Klebstoff der Seepocke“ für permanentes Kleben geeignet wäre. Erkenntnisse zum Klebemechanismus können darüber hinaus für die Gestaltung von Oberflächen genutzt werden, die Antihafteigenschaften aufweisen sollen.

Ein Problem für die Nutzung zum Kleben, dass zumeist ein physischer „Haftvermittler“, der eigentliche Klebstoff, notwendig ist. Für die Überführung von „bionischen/biomimetischen Klebstoffen“ in eine industrielle Dimension werden seitens potenzieller industrieller Anwender Herstellungsmöglichkeiten von marktrelevanten Mengen zu markt gängigen Preisen gefordert, was bisher nicht umsetzbar war. Andererseits ist zu bedenken, dass möglicherweise weniger Klebstoff für eine vergleichbare Haftung notwendig sein könnte als bei heutigen Systemen. Hintergrund für die intensive Suche nach neuen Lösungen ist die Tatsache, dass Verbindungstechniken wie Schweißen oder Kleben kostenintensive Prozesse sind: Einmal auf diese Weise verbundene Bauteile lassen sich bei Reparaturen oder einem späteren Recycling nicht mehr ohne Materialverlust voneinander lösen.

Neben dem Kleben mit Haftvermittler geht es in diesem Bereich auch um klebfreies Haften (wieder ablösbare Verbindungen zwischen Materialien/Oberflächen). Geforscht wird daher auch an Haftsystemen, die es erlauben, reversible feste Verbindungen von Werkstoffen ohne Schweißen oder Kleben aufzubauen. Ausgangspunkt ist die Fähigkeit von Insekten und Geckos, kopfüber selbst auf glatten Flächen laufen zu können. Die Laufflächen dieser Tiere sind mit feinsten Härchen überzogen, die

³¹ Abkürzungen: PP=Polypropylen; POM=Polyoxymethylen; ASA=Acrylnitril/Styrol/Acrylester; HD-PE=High-Density Polyethylen; PBT=Polybutylenterephthalat

³² Bionische Basis ist hier ein Modell der Haifischhaut.

³³ Die Vertriebsbezeichnung lautet „cell-tak“ (BD Biosciences 2006, USA). Der Preis für das biologische Material liegt bei ca. 160 US-Dollar/mg (Rischka 2006).

³⁴ Zentrale Forschungsgebiete sind das Verständnis von Protein-Protein- und Protein-Oberflächen-Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der hierbei ausgebildeten molekularen Adhäsionsmechanismen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden für die Entwicklung von Peptid-Polymer-Hybriden auf der Basis von Mefp-Peptiden der Miesmuschel genutzt. Es wird daran gearbeitet, die Wirkprinzipien auf voll-synthetische Materialien zu übertragen. Anwendungsgebiete für Proteinklebstoffe ergeben sich hierbei nicht nur im Bereich des „Klebens unter Wasser“, sondern insbesondere in der Medizin, also zum Kleben von Wunden (IFAM 2006b).

³⁵ Ein weiteres Beispiel für einen „Dualismus in der Bionik“ könnte man in der Entwicklung von selbstschärfenden Schneidwerkzeugen sehen (vgl. FN 4).

extrem hohe Adhäsionskräfte besitzen. Aus der Analyse der Zusammenhänge zwischen Struktur und Haftverhalten auf glatten und rauen Flächen entwickelten Materialwissenschaftler allgemeine Gesetze für das Verhalten solcher Verbindungssysteme (Arzt/Gorb 2005). Meistens braucht man auch hier noch einen Kontaktvermittler (ist auch bei den Tieren der Fall) (Gorb 2006). Neueste Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass diese Kontakte auch ohne die Zugabe von Flüssigkeiten funktionieren können (biopore 2006).

3. Ausgewählte Anwendungsfelder

Neue Erkenntnisse in der Materialentwicklung wirken sich häufig in unterschiedlichen Technologiefeldern aus. Im Folgenden werden exemplarisch ausgewählte Anwendungspotenziale mit Materialbezug im Automobilbau und in der Bautechnik thematisiert. Die beiden Bereiche zeigen auch, dass „Material und Konstruktion“ thematisch zusammengehören, so dass hier auch auf konstruktive Aspekte eingegangen wird.

3.1 Automobilbau

Der Automobilbau ist traditionell eine „High-Tech-orientierte“ Branche, die Spitzentechnologien relativ schnell auch einem breiten Kundenkreis zugänglich macht.

Aktuelle Trends

Der heute noch dominierende Werkstoff im Automobil ist Stahl mit ca. 50 Prozent. Aktuelle Tendenzen der Werkstoffentwicklung zeigen ansteigende Anteile von Leichtmetallen und Polymerwerkstoffen, insbesondere faserverstärkten Thermoplasten. Die Substitution von metallischen Komponenten durch Faserverbundbauteile ist bei Verkleidungselementen, Motorträgern, Kardanwellen und Schraubenfedern zu erkennen. Der Fahrzeugbau lässt sich insgesamt durch ein „Multi-Material-Design“ charakterisieren. Zukünftige Herausforderungen werden in der Auswahl des optimalen Werkstoffmixes gesehen (UMSICHT 2005).

Eine Schlüsseltechnologie im modernen Automobilbau ist der Leichtbau – als Zusammenspiel integraler Konstruktionsprinzipien, optimierter Auslegung, angepasster Herstellungsverfahren und zweckgerechtem Werkstoffeinsatz aller Fahrzeugkomponenten. Ziel ist u. a. die Einsparung von Material, Gewicht und Kraftstoffverbrauch.³⁶ An Leichtbauentwicklungen bzw. Leichtbaumaterialien werden dieselben hohen Anforderungen gestellt wie an traditionelle Materialien: Sie müssen Funktion und Sicherheit gewährleisten, eine gute Verarbeitbarkeit, akzeptable Herstellkosten und geringe Unterhaltungskosten in sich vereinen (Universität Kassel 2005a).

³⁶ Bis 2011 wird eine Gewichtsreduktion um 30 Prozent prognostiziert, was einer potenziellen Einsparung von 1,6 Litern pro 100 Kilometer entspricht (Zschech/Rauh 2001).

Zukünftig sollen Automobile zudem „intelligenter“ werden. Dieses Ziel soll durch den Einsatz zusätzlicher elektronischer Komponenten und durch die Integration intelligenter Werkstoffe (Smart Materials) erreicht werden, z. B. durch Bauteile, die sich bei ansteigender Belastung verfestigen. Anwendungsmöglichkeiten werden auch von Metallen mit „Memory-Effekt“ erwartet. So genannte „elektro-rheologische Flüssigkeiten“ könnten in Stoßdämpfern Anwendung finden, damit diese sich spezifischen Belastungen anpassen können (Universität Kassel 2005b).

Ein weiterer innovativer Trend im Automobilbau ist die Nanotechnologie. Das Spektrum nanotechnologischer Innovationsbemühungen reicht von bereits eingesetzten Komponenten über konkrete Entwicklungsaktivitäten bis hin zu Ideen mit allenfalls langfristiger Realisierbarkeit. Zum Teil handelt es sich dabei um grundlegend neue Entwicklungen mit weit reichenden Auswirkungen auf das Produkt. Nanotechnologische Entwicklungen können in allen Subsystemen bzw. Komponenten des Automobils eine Rolle spielen. Beispiele sind Nanopartikel als Füllstoff in Autoreifen (realisiert, Weiterentwicklung), Antireflexbeschichtungen (realisiert), nanopartikelverstärkte Polymere und Metalle (Entwicklungsphase, zum Teil realisiert), nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler (in Entwicklung), katalytische Nanopartikel als Zusatz in Kraftstoffen (Forschungsstadium), nanoporöse Filter zur Minimierung der Emission von Partikeln im Nanometerbereich (Zukunft), hydrophile Oberflächenschichten als Antibeschlagschichten (Zukunft), „selbstaushelnde“ Lacke, z. B. durch Selbstorganisation (allenfalls langfristig) (TAB 2003).

Bionische Lösungen

Die Erwartungen der Automobilbranche an die Bionik sind soweit ausgeprägt, dass es bereits konkrete Umsetzungen gibt. Ansatzpunkte für fahrzeugtechnische Anwendungen liegen in der Konstruktion nach bionischem Vorbild (Stichwort optimierter Leichtbau), in der strömungstechnischen Optimierung von Fahrzeugen sowie in der Optimierung einzelner Komponenten. Beispiele hierfür sind die lt. Fahrzeughersteller nach einem biologischen Vorbild optimierte Form eines Konzeptfahrzeuges (Bionic-Car), spezielle Felgenentwicklungen oder auch die Reifenprofiloptimierung.

Das sog. „Bionic-Car“ hat optische Analogien zum Kofferrisch³⁷; es weist einen ähnlichen c_w -Wert auf, verglichen mit dem aerodynamisch berechneten Kofferrischmodell (Mercedes-Benz 2005), welcher im Kleinwagenbereich bisher nicht erreicht wurde. Für die Konstruktion der Karosserie wurde eine weiterentwickelte Software (SKO-Methode³⁸, Soft Kill Option) ver-

³⁷ Zu Analogien zum Kofferrisch als Formvorbilder für wendige Unterseeboote und widerstandsarme Kraftfahrzeuge s. a. Nachtigall (2002, S. 202 f.).

³⁸ Das Computerprogramm zur Optimierung von Bauteilen wurde ursprünglich von Prof. Mattheck vom Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt. Dieses orientiert sich ebenfalls an der Natur, wobei nach dem „Vorbild von Fresszellen“ im menschlichen Körper, die etwa in Knochen Material an wenig belasteten Stellen abbauen, in mehreren Stufen z. B. die Karosserie reduziert wird.

wendet, wobei mittels Computersimulation Werkstoff in Bereichen mit geringer Belastung weicher gestaltet und im Ergebnis völlig herausgeschnitten („gekillt“) wird. Ein ähnliches Verfahren wird auch von der Fa. BMW zur Optimierung von Motorradfelgen genutzt. Diese wurden im Ergebnis etwa 20 Prozent leichter gestaltet (Szentpétery 2005).

Beispiele für die Nutzung biologischer Vorbilder finden sich auch in der Reifenentwicklung. Lt. Hersteller wurden – um die Kraftverteilung des Reifens auf der Straße weiter zu optimieren – beispielsweise die Füße des Baumfroschs sowie von Katzen analysiert. Das Ergebnis wird mit einer besonderen Profilform und verbesserten Kraftübertragung³⁹ beim Bremsen beschrieben (Andres 2005; Burgdorf 2001; Mundl/ Stache 2005). Zum Stichwort „smart materials“ gibt es Entwicklungen, Verletzungen bei pneumatischen Strukturen automatisch abzudichten (z. B. der Autoreifen „Protetis“ der Fa. Kléber, wo eine hochelastische Polymerbeschichtung Verletzungen dauerhaft abdichten soll) (Speck et al. 2006).

Ein schon länger am Markt verfügbarer Werkstoff ist Schaumaluminium, das als Sandwichkonstruktion hohe Festigkeiten mit niedrigem spezifischem Gewicht ($1/10$ des Vollmaterials) verbindet. Die Anbindung an die Bionik wird darin gesehen, dass das Konstruktionsprinzip in Anlehnung an natürliche Knochengewebe aufgebaut ist.⁴⁰ Automobilhersteller setzen Metallschäume z. B. für die Produktion von PKW-Frontscheiben ein (UMSICHT 2005.)

Weiterhin sind insbesondere für zukünftige Anwendungen als Ideengeber die folgenden Themenfelder interessant:

- Strukturen und Materialien pflanzlicher Achsen: Als biologische Vorbilder für Leichtbaukonstruktionen könnten z. B. die des Winterschachtelhalms (*Equisetum hyemale*) und des Pfahlrohres (*Arundo donax*) dienen. Ein derzeit entwickelter Werkstoff ist aus PU-Schaum und Hanfgewebe aufgebaut und vereint verschiedene Prinzipien des Winterschachtelhalms und des Pfahlrohres. Er zeichnet sich, bezogen auf das spezifische Gewicht, durch sehr hohe Biegesteifigkeiten, ausgeprägte dynamische Belastbarkeit und Dämpfung aus (Harder 2005; Speck et al. 2005).
- Adaptive und selbstreparierende Werkstoffe (etwa auch auf Basis von Pflanzenhalmen): So zeichnen sich Achsen von Süßgräsern und Schachtelhalmen durch variable Steifigkeiten aus, die aus ihrer Konstruktionsweise, ihrer inneren Struktur und dem veränderbarem

Innendruck spezieller Zellen resultiert. Für die technische Umsetzung sind auf äußere Einflüsse anpassbare Werkstoffe denkbar, z. B. im Automobilbau als variable Bauteile, wie Spoiler, die sich wechselnder Aerodynamik anpassen können (UMSICHT 2005, S. 107).

- Selbstreinigende Oberflächen: Systeme, die auf dem Lotus-Effekt basieren, stehen hier in Konkurrenz zu „easy-to-clean“-Systemen auf Nanobasis. Bei konkurrierenden Systemen werden nanoporöse Strukturen durch Sol-Gel-Prozesse an der Oberfläche ausgeprägt. Diese Beschichtungen sind gegenüber der bionischen Ausführung jedoch kratzfest und transparent und stellen trotz ihrer geringeren Effizienz als Glasbeschichtungen den Stand der Technik am Automobil dar. An weiterführenden Entwicklungen zur Überwindung der Nachteile der bionischen Ausführung arbeiten verschiedene Firmen⁴¹ (u. a. BASF AG, Degussa) (BASF 2002; Frisch 2004, Küppers 2004; UMSICHT 2005d).
- Oberflächentechnik: z. B. werden Mottenaugenstrukturen zur Entspiegelung von Kunststoffbauteilen genutzt. Über holographische Strukturierung lassen sich großflächige Prägestempel mit künstlichen Mottenaugenstrukturen herstellen, wodurch sich Mottenaugenstrukturen über verschiedene Replikationsverfahren in Kunststoffe abformen lassen. Das Verfahren wird aktuell zur Entspiegelung von transparenten Abdeckungen im Automobil durch die Robert Bosch GmbH bis zur Serienreife geführt. Ein Hemmnis bei der Markteinführung stellt die so genannte Fingerprintproblematik dar: Durch Fingerabdrücke verliert die Oberfläche ihre optische Wirkung. Bei konventionellen Anti-Reflex-Beschichtungen können diese trocken abgewischt werden, beim Mottenaugeneffekt muss das Fett nass mittels Wasser und Tensid aus der nanometerfeinen Struktur entfernt werden (FhG-2005; UMSICHT 2005d).
- Kleben: Kleben statt Schweißen ist auch im Automobilbau ein wesentliches Thema (Kesel 2005). Bionische Lösungen könnten auch hier verwendet werden, wobei der Entwicklungsstand momentan noch eher in der Grundlagenforschung angesiedelt ist.

An den aufgeführten Beispielen ist ersichtlich, dass der Übergang zu Phänomenen der Nanotechnologie fließend ist (z. B. Oberflächenphänomene). Bionische Aspekte, die zu Fortschritten im Automobilbau geführt haben, sind hauptsächlich im konstruktiven Bereich (Leichtbaustrukturen) zu finden. Inwieweit in den aufgeführten Produkten alle benannten Beispiele auch wirklich Aspekten des „bionischen Lernens“ gefolgt wird (oder diese eher als

³⁹ Die Katzenpfote macht sich beim Bremsen breit und überträgt daher mehr Kraft auf den Untergrund als beim normalen Laufen. Diese Eigenschaft wurde mittels eines neuartigen Verfahrens, auf den Reifen übertragen und im Ergebnis der Bremsweg verringert.

⁴⁰ Ähnliche Strukturen sind in Knochen zu finden. Hier besteht das schwammartige Gerüstwerk aus feinen Knochenbalken, den sog. Spongiosa, die an bestimmten belasteten Stellen im Knochen entlang der Spannungstrajektorien ausgerichtet sind. Spongiosa sind zudem in der Lage, sich bei Änderung der Belastung relativ schnell neu auszurichten, was Aluminiumschäume allerdings nicht können (Rechberger 2006).

⁴¹ Eine serientechnische Umsetzung von Kunststoffbauteilen mit Lotus-Struktur wurde kürzlich von der DEGUSSA AG erreicht. Dabei bewirken Nanopartikel eine Strukturierung der Oberfläche. Die Nanopartikel werden auf die Oberfläche konventioneller Spritzgießformen gesprüht. Nach erfolgtem Einspritzprozess sind die Partikel im Werkstoff verkrallt. Zurzeit wird an Lösungen mit anderen Kunststoffverarbeitungsprozessen wie Extrudieren, Tiefziehen und dem für den Automobilbau bedeutenden Sinterprozess geforscht. Zukünftig sollen Lotus-Effekt-Partikel direkt in das Material eincompoundiert werden können (KI 2005).

Marketingmaßnahme aufzufassen sind), lässt sich im Rahmen dieser Vorstudie nicht abschließend beurteilen. Offen bleibt in den meisten Fällen, wie eine Gesamtbilanz (z. B. Ökobilanz, die die energetische Seite sowie das Recycling integriert) des Produktes aussieht. Hier besteht sicher noch Forschungsbedarf.

3.2 Bautechnik und Architektur

Beide Bereiche verbinden sich mit der Bau- oder auch Architektur-Bionik. Auch hier gibt es bereits umgesetzte Projekte und einen deutlichen Bezug zur konstruktiven Seite.

Aktuelle Trends

Ebenso wie in der Automobiltechnik ist ein Trend zum Leichtbau zu erkennen. Allerdings soll darauf verwiesen werden, dass in der Architektur mehr noch als in anderen Branchen eine sog. „visuelle Bionik“⁴² zum Einsatz kommt (Schäfer et al. 2005).

Bauwerke sollen zunächst visuell leicht und transparent sein, allerdings ohne dass ihre Funktion eingeschränkt wird. Da auch funktionelle Steifigkeit und Robustheit gefordert wird, kommen Fortschritte auf dem Gebiet des Leichtbaus zum Tragen. Oft werden neue Entwicklungen von der materialtechnologischen Seite ausgelöst. So haben es neue Baustähle und die Entwicklung neuer hochfester Betontypen Architekten ermöglicht, leichter zu bauen. In diesem Zusammenhang wird zukünftig Verbundwerkstoffen eine entscheidende Rolle zugesprochen (UMSICHT 2005, S. 108).

Als besondere Herausforderung vor dem Hintergrund des Leichtbaus und der damit verbundenen offenen Bauweise sowie verglaster Strukturen gilt die Regulierung des Gebäudeklimas. Neben konstruktiven Lösungen zum Luftaustausch wird eine Regulierung des Gebäudeklimas durch innovative Materialien verfolgt. Beispielsweise können so genannte „Phase Change Materials“ (PCM) Energie speichern und zeitversetzt wieder abgeben. Durch den Einsatz im Putz beispielsweise helfen sie, die Raumtemperatur zu regulieren und Heiz- bzw. Kühlenergie einzusparen. Gebäudehüllen werden zunehmend multifunktional. Ihre Materialien sollen die Lichttransmission regulieren, aber auch Energie erzeugen können. Durch den Einsatz von Solarzellen dienen Fassaden zukünftig auch der Energiegewinnung. Die großen Glasflächen moderner Fassaden erfordern zudem einen hohen Reinigungsaufwand. Entsprechende Beschichtungssysteme, die eine Selbstreinigung der Flächen ermöglichen, sind aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv. Gleiches gilt für

Beschichtungen zur Entspiegelung von Glasflächen (UMSICHT 2005).

Der heutige Trend zu wandelbaren Bauten, die als Multifunktionstragwerke kurzfristige Nutzungsänderungen erlauben, soll dahingehend erweitert werden, dass Bauwerke zukünftig auch intelligente Komponenten besitzen. So sollen sich beispielsweise Brücken eigenständig wechselnden Belastungen durch Verkehr- oder Windlasten anpassen können. Zurzeit wird versucht, adaptive Fähigkeiten durch Integration makroskopischer Systeme in Gebäudehüllen und Tragwerke zu erzielen. So werden beispielsweise Längenänderungen in Seilsystemen durch Pressen realisiert, die über eine entsprechende Sensorik und Steuerelemente angesprochen werden. Große Schwingungsdämpfer könnten Hochhäuser erdbebensicherer machen (Innovationsreport 2005; Schlaich 2004).

Als Zukunftsvisionen sind jedoch mikroskopische und damit werkstoffliche Lösungen angedacht: „Smart Materials“, wie formvariable Materialien (piezoelektrische Keramiken und Polymere, chemostriktive und elektroaktive Materialien), phasenveränderliche Materialien (elektorrheologische oder magnetrheologische Fluide), lichtemittierende Materialien (Photo- oder Elektrolumineszenz), farbveränderliche Materialien (z. B. gasochromes Glas) und adhäsionsveränderliche Materialien (photo- oder thermoadhäsive Materialien) sollen zukünftig in der Bautechnik Einsatz finden (UMSICHT 2005).

Auch im Bauwesen gibt es eine Fülle von Möglichkeiten für Anwendungen nanotechnologischer Entwicklungen. So können Siliziumdioxid-Nanopartikel in synthetischen Kieselsäuren (Nanosilica) als Zusatzmittel für Spritz- und Hochleistungsbeton eingesetzt werden und zur Verbesserung der Haftzug- und Haftscherfestigkeit zwischen Beton und Bewehrungsstahl beitragen. Durch nanometerdünne Multilagenbeschichtung aus leitenden Polymeren ist ein verbesserter Korrosionsschutz bei Verwendung von Karbonstahl oder Edelstahl als Baumaterial realisierbar. Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der Gebäudewärmedämmung (z. B. Einsatz von Fensterflächen zur transparenten Wärmedämmung durch Aufbringen einer wenige nanometerdicken, unsichtbaren Silberschicht), bei der Außenflächengestaltung (z. B. Einstellung von Funktionen wie Selbstreinigung, Anti-Graffiti-Schutz oder hohe Kratz- und Abriebfestigkeit bei Kunststoffen durch geeignete Beschichtungen) und im Innenbereich (z. B. Einsatz von Titandioxid-Nanopartikeln als Additive in Lacken zum Schutz vor Verfärbungen durch Kunst- und Tageslicht) (TAB 2003).

Bionische Lösungen

Für konstruktive Lösungen gibt es in der Architektur „bionische Klassiker“. Ein Beispiel für die „Versteifung durch Faltung“ ist der Bau des Kristallpalastes (1851) durch Joseph Paxton. Er setzte mit seinem Konzept nach konstruktiven Erkenntnissen um Stabilitätszusammenhänge der Riesenseerose (*Victoria amazonica*) eine für damalige Verhältnisse extrem große Konstruktion um. Eine gefaltete Oberfläche verlieh ihr die notwendige Aus-

⁴² Gestalterische, formale Ideen aufgrund visueller Ähnlichkeiten mit dem natürlichen Phänomen werden i.A. nicht unter bionisches Arbeiten gefasst. So wenig wie ein Flugzeug, das aussieht wie ein Vogel, fliegen kann, genauso wenig ist ein Hochhaus strukturell optimiert, das aussieht wie ein Grashalm. Ein Wohnhaus ist auch nicht deshalb räumlich optimiert, weil es wie eine Bienenwabe aufgebaut ist. „Visuelle Bionik“ bleibt an der Oberfläche, der erste optische Eindruck ist ausschlaggebend, aber für den strukturellen Optimierungsprozess wenig hilfreich (Schäfer et al. 2005).

steifung. Anlässlich der Weltausstellung von 1851 in London war es zudem das erste Bauwerk, das lediglich aus Stahl und Glas bestand. Auch für „Querkraftstrukturen“ (z. B. Konstruktion von Deckenunterschichten eines Fabrikgebäudes (Gatti in Rom) durch Nervi, welche analogen Verlauf zu lastabtragenden Linien zeigten) und „zugbeanspruchte Konstruktionen“ (z. B. Zeltkonstruktionen nach Spinnenweben von Otto für den deutschen Pavillon auf der EXPO 1967) finden sich Anwendungen in der Bauhistorie (Nachtigall 2003; Schäfer et al. 2005).

Im Zuge neuer mechanischer und statischer Berechnungsmethoden kann heute materialgerecht und am Kraftfluss orientiert entworfen werden. Hierbei ergeben sich oft erstaunliche Analogien zu natürlichen Gebilden, wobei weiterhin jedoch konventionelle Materialien verarbeitet wurden. Das Ergebnis eines bewussten bionischen Einflusses hingegen wird in der Fachwelt als „Bionische Baukunst“ bezeichnet, beschränkt sich aber bislang auf konstruktive Elemente. Im Vordergrund stehen hier Belüftungskonzepte zur Bauklimatisierung, z. B. nach dem Vorbild des Präriehundbaus, oder solare Konzepte, die sich beispielsweise an der Bauweise von Termitenhügeln orientieren (Biokon 2005b; Nachtigall 2002; Schlaich 2004).

Direkte werkstoffliche Entwicklungsansätze im Sinne der Bionik sind im Bereich von Tragstrukturen zu erkennen. Hohe Lasten, die von kleinen Querschnitten getragen werden sollen, bieten Ansätze für die Anwendung hierarchisch strukturierter Verbundstrukturen. Hier kommen auch pflanzliche Achsen, beispielsweise die des Bambus⁴³, als Ideengeber zur Entwicklung neuer Komposite in Frage. Diese befinden sich derzeit im Entwicklungsstadium (UMSICHT 2005).

Ein Hemmnis ist in diesem Zusammenhang das im Bauwesen übliche „Safe-Life-Konzept“, die Realisierung unbedingter Ausfallsicherheit, wodurch die Bauwirtschaft traditionell konservativ-zurückhaltend auf neue Werkstoffe reagiert. Aktuell ist aber eine Öffnung der Bauwirtschaft für bionisch inspirierte Lösungen zu verzeichnen, da das Potenzial natürlicher Prinzipien zunehmend erkannt wird. Für adaptive bzw. intelligente Bauwerke kann die Bionik insbesondere bei der Entwicklung mikroskopischer materialintegrierter Systeme als Ideenquelle dienen. Aktuell werden in diesem Zusammenhang „atmende Fassaden“ entwickelt, die nach Vorbild der Hautatmung von Amphibien entstehen. Ziel ist es, eine gaspermeable Glasmatrix zu entwickeln (UMSICHT 2005b).

⁴³ Neben dem Bambus als Ideengeber für neue Materialstrukturen gibt es auch die Ideen, diesen als Vorlage für ein Hochhaus zu nutzen. Der „Bionik-Tower“, der in Singapur gebaut werden soll, hat aber keinen wirklichen bionischen Bezug. „Das ist ein knapp zwei Kilometer hohes Bürogebäude, das ein bisschen so aussieht wie ein Bambushalm. In diesem „Bionik-Tower“ ist aber – zumindest soweit bekannt ist – wenig Bionik drin, denn wenn er tatsächlich nach dem Vorbild des Bambus gebaut würde, dann hätte er bei zwei Kilometern Höhe an der Spitze eine Schwingungsamplitude von mehreren hundert Metern. Das wäre sicherlich nachteilig für die dort arbeitenden Menschen“ (Speck 2005).

Transparente Isoliermaterialien (TIM) wirken nach dem Prinzip des Eisbärenfells.⁴⁴ Durch die Kombination von Streuung, Totalreflexion, Lumineszenz und Luftpfeinchluss wirkt das Fell des Eisbären als solar betriebene Wärmepumpe, welches gleichzeitig dämmt und heizt. In der technischen Umsetzung werden dünne Glasröhrchen dicht nebeneinander senkrecht auf schwarz gestrichenen Beton geklebt und mit Glasputz oder Scheiben verschlossen. Das Material wurde bereits vor ca. 20 Jahren entwickelt. Es ist nicht eindeutig klar, ob das Eisbärenfell bei der Ideenfindung im Sinne der Bionik als Vorbild gedient hat. Aktuell wird das Prinzip dahingehend weiterentwickelt, dass durch saisonale Verschattung ein Überhitzen bei zu starker Sonneneinstrahlung vermieden wird. Dazu werden spezielle Prismen als Abdeckung auf die Glasröhrchen geklebt, wodurch erreicht wird, dass bei großen Sonneneinstrahlungswinkeln ein Großteil des Lichts reflektiert wird. In einem aktuellen Entwicklungsprojekt der Firma INGLAS Innovative Glassysteme GmbH wird versucht, die Prismenstruktur über Kunststofffolien mit Mottenaugenstruktur (s. a. Kap. IV.3.1) aufzubringen. INGLAS erhofft sich so eine deutliche Kostenreduzierung im Vergleich zu bisherigen Lösungen (s. a. DBU 2004; Nachtigall 2002; UMSICHT 2005c).

Selbstreinigende Oberflächen können an Bauwerken heute auf verschiedene Weise aufgebracht werden sowohl als selbstreinigende Fassadenfarbe (StoLotusan Color der Fa. STO AG) wie auch als Putz mit Selbstreinigungseffekt (StoLotusan K bzw. MP). Die Fa. CREAVIS entwickelt aktuell selbstreinigende Kunststofffolien, wobei die notwendigen Nanostrukturen über Prägeverfahren aufgetragen werden (FHG 2005; UMSICHT 2005d). Seit Mitte 2004 bietet die Firma ERLUS Baustoffwerke AG selbstreinigende Dachziegel in drei unterschiedlichen Formen und je drei Farbtöne an. Durch den kombinierten Einsatz von Lotus-Effekt und speziellen Nanopartikeln sowie natürlichen Mineralien werden organische Verunreinigungen oxidiert und abgewaschen, ein Prozess, den Biologen als „oxidative burst“ bezeichnen (Bauzentrale 2004).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass materialeitig unter bionischen Aspekten bei den „Baustoffen der Zukunft“ nicht viel wirklich Neues zu finden ist. Dagegen sind aus konstruktiver Sicht bionische Bauweisen nach wie vor hoch interessant. Neben der Orientierung an natürlichen Formen bei Bauwerken, was meistens nicht wirklich unter bionischem Lernen einzuordnen ist, haben sich bionische Entwicklungen bisher eher auf konstruk-

⁴⁴ Detaillierte Arbeiten zum Eisbärenhaar, die dieses beschreiben als eigenartige, total reflektierende innere Zentralzylinder, wobei die Insertion (Einbau) der Haare in eine dunkle Schicht der Oberhaut erfolgt, was zu einer besonderen Isolationseigenschaft des Fells führt, wurden in der Arbeitsgruppe von Prof. H. Tributsch durchgeführt. In diesen Arbeiten haben sich erstaunliche Analogien herausgestellt zwischen dem modernen Bau- und Funktionsstoff TIM und dem Fell des Eisbären. Auch wenn beide Entwicklungen getrennt verlaufen sind, erlaubt einerseits die Anwendung der TIM-Prinzipien auf das Eisbärenfell ein besseres Verständnis dieser biologischen Konstruktion (Gesichtspunkt der „technischen Biologie“), und Eigenheiten des Fells können andererseits Anregungen für weiteres technisches Gestalten geben (Gesichtspunkt „der Bionik“) (Nachtigall 2003, S. 35).

tive Elemente beschränkt. Auch ein „komplett bionisch konstruiertes Haus“ existiert noch nicht. Für eine weitere Integration von Bionik in die Bautechnik müsste man sich sicherlich auch mit der „Lebenszeit von Gebäuden“ befassen. Darüber hinaus wäre bei neuen Entwicklungen auch die ökologische Gesamtbilanz (energetisch, Recycling der Baustoffe etc.) zu berücksichtigen.

4. Chancen und Risiken

Hier gibt es verschiedene Aspekte zu betrachten, welche im Folgenden speziell auf den Einsatz von bionischen Materialien und Werkstoffen bezogen betrachtet werden sollen. Die Ausführungen bauen auf UMSICHT (2005) auf.

Biologische Materialbildungsprozesse sind im Vergleich zu technischen Materialbildungsprozessen (Massenkristallisation, Erstarrung von Schmelzen etc.) hochkomplex. Das detaillierte Verständnis der hier zu Grunde liegenden Mechanismen der Selbstorganisation von Biomolekülen etwa zu Template-Strukturen, die exakte Steuerung der Übersättigung – als eine zwingende Voraussetzung für die Feststoffbildung – und die Regulierung der Produktmorphologie ist für eine technische Übertragung evident. Derzeit dominiert in diesem Bereich noch die Grundlagenforschung.

Gute Chancen für eine technische Anwendung bestehen bereits heute bei der Gestaltung von Oberflächen. Hier spielt die Tatsache, dass biologische Materialbildungsprozesse eher langsam ablaufen, aufgrund der in vielen Fällen geringen Materialmenge, die zur Einstellung bestimmter Oberflächeneigenschaften abzuscheiden ist, keine Rolle. Vielfach ist eine Übertragung des strukturellen Aufbaus biologischer auf technische Werkstoffe möglich, ohne dass dabei die Herstellung bionischen Prinzipien entsprechen muss.⁴⁵ Insbesondere neuere technische Möglichkeiten, die aus den Fortschritten in der Mikro- und Nanotechnologie resultieren, bieten das Potenzial, technische Materialien ähnlich hoch zu strukturieren wie ihre biologischen Vorbilder. Eine Abgrenzung von nanotechnologisch zu bionisch ist an dieser Stelle nicht mehr ohne weiteres möglich.

Großes Potenzial für die Zukunft dürften im Bereich der Oberflächen bei den bereits bekannten Effekte zur Strömungsbeeinflussung und Selbstreinigung sowie bei den bislang erst geringfügig bearbeiteten Mechanismen der verbesserten Abriebsbeständigkeit und Selbstheilung liegen. Ein ähnlich hohes Potenzial kann für bionische Membranen und Textilien erwartet werden. Vorsichtiger zu bewerten sind die Chancen für bionische Werkstoffe in der Anwendung als kompakte Bauteile, da technische Umsetzungsschwierigkeiten bei der Nachbildung der inneren Struktur biologischer Vorbilder (entstanden aus langen Wachstumsprozessen) zu erwarten sind.

⁴⁵ In der Regel werden ja auch andere Materialien benutzt als in der Natur, da sich die Belastungssituation in der Technik oft von der in der Biologie unterscheidet. Die Gestaltung der Herstellung nach bionischen Prinzipien wäre ein Zusatzeffekt.

Ein weiteres zentrales Problem stellt die Tatsache dar, dass biologische Materialien in der Regel hochstrukturierte Komposite sind, die aber trotzdem problemlos biologisch abbaubar sind. Zudem sind deren Rohstoffe breit und unkompliziert verfügbar. Eine vergleichbare Abbaubarkeit bei einer Übertragung auf heute technisch relevante Werkstoffe ist derzeit nur selten gegeben, was u. a. am Anforderungsprofil heutiger Werkstoffe (z. B. Sicherheit) liegt. Darüber hinaus erschwert gerade der Kompositcharakter heutiger Werkstoffe das entsprechende Recycling, welches für eine effiziente, ressourcenschonende Materialwirtschaft ein wesentliches Kriterium darstellt. Daher ist auch die Materialwahl von besonderer Bedeutung bei bionischer Materialentwicklung.

Eigenschaften biologischer Materialien, die zumindest teilweise auch bei der Übertragung auf technische Materialien erreicht werden sollen und aus denen sich die Hoffnung speist, dass bionische Materialien auch nachhaltige Materialien sein können, sind: Multifunktionalität, modularer bzw. hierarchischer Aufbau, adaptive und nicht toxische Eigenschaften, ressourceneffiziente Auslegung, kreislauffähiges Recycling, Opportunismus in der Materialauswahl. Daraus ließe sich dann auch eine entsprechende Wirtschaftlichkeit bei Herstellung und Nutzung ableiten. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich bei der bionischen Übertragung einer biologischen Lösung auch der Kontext ändert und die Eingepasstheit der technischen Lösung in diesen Kontext nicht per se gegeben ist. Um dies dennoch zu erreichen, wäre eine umfassende Ähnlichkeitsbetrachtung bei der bionischen Transformation erforderlich, die die Verfügbarkeit der Ressourcen und ihre ökotoxikologischen Wechselwirkungen mit der Umgebung einbezieht. Damit würde der Übertragungsvorgang deutlich an Komplexität zunehmen. Momentan geht es in vielen Fällen jedoch noch mehr um das Grundverständnis biologischer Vorgänge.

Gute Einsatzchancen wiederum haben konstruktive Ansätze, die bionisches Wissen etwa für Leichtbaukonstruktionen verfügbar machen. Hier sind bereits Computersimulationen im Einsatz (z. B. SKO-Methode), die den Materialbedarf für gegebene Konstruktionsentwürfe entsprechend der Belastung optimieren. Dies führt zu signifikanten Materialeinsparungen und auch zu unkonventionellem Design. Durch deren Einsatz ist jedoch nicht zwingend gegeben, dass die dann verwendeten Materialien und Werkstoffe auch ökologischen Kriterien entsprechen. Auch stehen bei bisherigen Umsetzungen in potenzielle Produkte ökobilanzielle Bewertungen (im Sinne einer Gesamtbilanz) noch aus.

5. Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass biologische Materialien ressourceneffizient gestaltet sind und sich durch eine hohe Stabilität und Funktionalität bei verhältnismäßig geringem Materialeinsatz auszeichnen. Die Materialien sind zudem in der Regel in der Umgebung leicht verfügbar (Opportunismusprinzip in der Materialauswahl). In der Natur finden sich keine Hochleistungswerkstoffe, sondern einfache Materialien mit einer effizienten

inneren Struktur, die auf die jeweilige biologische Konstruktion perfekt abgestimmt sind, und so aus technischer Sicht erstaunliche mechanische Eigenschaften erzielen. Das Ergebnis sind oftmals streng funktionell, hierarchisch aufgebaute Werkstoffe, was u. a. im Wachstum natürlicher Materialien begründet ist. Natürliche Systeme werden aus einzelnen Molekülen aufgebaut und gestalten sich daher sukzessiv „bottom-up“.

Ein charakteristisches Merkmal natürlicher Materialien ist oft die Verwendung chemisch identischer Grundwerkstoffe, die, unterschiedlich strukturiert, physikalisch unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Durch ihre Kombination als Mehrkomponentenmaterialien oder Komposite zeichnen sich viele Materialien durch eine aus technischer Sichtweise ideale Kombination sich vielfach widersprechender Materialeigenschaften, wie Festigkeit und Elastizität, aus. Multifunktionalität stellt einen wesentlichen Beitrag zur Effizienz biologischer Materialien dar. Biologische Materialien besitzen eine an die Funktion angepasste Lebensdauer. Aufgrund der einfachen chemischen Basis sind alle Materialien biologisch abbaubar und damit Bestandteil eines natürlichen Kreislaufs.

Die Menge an werkstoffbasierten Entwicklungen ist schier unüberschaubar, so dass eine Einordnung, was den Stand der Forschung anbelangt, nicht trivial ist. Dennoch ist festzuhalten, dass die Bionik bei zukünftigen Materialentwicklungen eine bedeutende Rolle einnehmen kann. Denn Eigenschaften natürlicher Materialien – wie adaptive Fähigkeiten, Multifunktionalität und ressourceneffizienter Aufbau – sind gleichzeitig auch Eigenschaften, die Ziele aktueller Werkstoffentwicklungen darstellen. Voraussetzung ist jedoch ein tieferes Verständnis für das Zusammenwirken von Funktion und Aufbau natürlicher Materialien sowie der Mechanismen der Entstehung, Umformung und Selbstheilung.

Für Automobilbau und Bautechnik/Architektur kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Bionik unterschiedlich wirksame Beiträge zu (zukünftigen) Technologien leisten kann. Dabei garantiert die unmittelbare „Nähe zur Natur“ – als Vorbildfunktion und als zumeist erster Verfahrensschritt bionischer Forschung – nicht per se einen nachhaltigen, heute oder zukünftig praxisrelevanten Einsatz. Ein sich abzeichnendes Charakteristikum umgesetzter bionischer Lösungen ist, dass sie eine hohe Anzahl neuer Entwicklungs- und Produktideen nach sich ziehen – nicht notwendigerweise ausschließlich bionischer Art, wie am Beispiel selbstreinigender, superhydrophober Oberflächen und Materialien dargestellt.

V. Neue Bionik

Die so genannte „neue Bionik“ schließt an aktuelle Entwicklungen in Nanotechnologie und Evolutionsbiologie an. Sie umfasst einerseits molekularbiologisch inspirierte Ansätze der Nanobiotechnologie (Kap. V.1), der Prothetik (Kap. V.2) mit engen Verbindungen zu den „konvergierenden Technologien“ (Roco/Bainbridge 2002). Andererseits bestehen neue Verbindungen aus der

Evolutionsbiologie vor allem zur Informationstechnik (Kap. V.3) und in Bezug auf die Nutzung von Prinzipien kollektiven Verhaltens von Lebewesen für Organisation und Management (Kap. V.4).

1. Nanobionik

Nanobionik ist ein erst mehrere Jahre verwendeter und noch nicht durchgängig etablierter Begriff. In der Nanobionik wird der bionische Gedankengang – der Transfer von an lebenden Systemen erworbenem Wissen auf technische Problemlösungen – auf die molekularbiologische Ebene übertragen. Dieses Kapitel beruht zu großen Teilen auf dem Gutachten von IÖW/GL (2005).

1.1 Begriffliches zur Nanobionik und ihrem Umfeld

Der Begriff der Nanobionik wird zum Teil deckungsgleich mit „Nanobiotechnologie“ verwendet. Ein klarer Sprachgebrauch hat sich bislang nicht etabliert. Charakteristisch ist, dass Methoden aus der Nanotechnologie zur Analyse und zur Beeinflussung lebender Systeme Verwendung finden, bis hin zum Ziel des Designs künstlichen Lebens in der Synthetischen Biologie.

1.1.1 Nanobiotechnologie

Bio- und Nanotechnologie gelten als zukunftssträchtige Technologien des 21. Jahrhunderts. An ihrer Schnittstelle hat sich die Nanobiotechnologie herausgebildet. Der Begriff der Nanobiotechnologie – auch das Wort „Bionanotechnologie“ wird gelegentlich verwendet – ist im Jahre 2000 im Kontext der National Nanotechnology Initiative der USA (NNI) geschaffen worden. Nanobiotechnologie schlägt die Brücke zwischen der unbelebten und belebten Natur und zielt darauf ab, biologische Funktionseinheiten in molekularer Hinsicht zu verstehen sowie funktionale Bausteine im nanoskaligen Maßstab unter Einbeziehung technischer Materialien, Schnittstellen und Grenzflächen kontrolliert zu erzeugen (VDI 2002).

Häufig wird unterschieden zwischen „Nano2Bio“, wo es um die Nutzung der Nanotechnologie für die Analyse und Herstellung biologischer Nanosysteme (z. B. subzellularer Strukturen und Vorgänge) geht, und „Bio2Nano“, das für die Nutzung von Materialien und Bauplänen aus lebenden Systemen zur Herstellung technischer Nanosysteme steht (VDI 2002, TAB 2003). Bereits von der Definition her ist klar, dass aus Sicht der Bionik „Bio2Nano“ im Mittelpunkt steht. Ausgangspunkt ist, dass sich grundlegende Lebensprozesse im Nanomaßstab abspielen, da wesentliche Bausteine des Lebens gerade diese Größenordnung haben (wie z. B. Proteine oder die DNA). Die Vorgänge in einer Zelle können mit nanotechnologischen Verfahren analysiert und technisch nutzbar gemacht werden. Molekulare „Fabriken“ (Mitochondrien) und „Transportsysteme“, wie sie im Zellstoffwechsel eine wesentliche Rolle spielen, können Vorbilder für kontrollierbare Bio-Nanomaschinen sein (Nachtigall 2002, S. 122 ff.). Auch Mechanismen der Energieerzeugung, molekulare

Fabriken und Transportsysteme sowie Datenspeicher und Datenlesesysteme großer Kapazität, in denen funktionelle Biomoleküle als Bestandteile von Lichtsammel- und Umwandlungsanlagen, Signalwandler, Katalysatoren, Pumpen oder Motoren arbeiten, finden das Interesse der Nanobiotechnologie.

Mit der Nanobiotechnologie werden vielfältige Potenziale zur gezielten Nutzung biologischer Prozesse für technische Zwecke verbunden (VDI 2002). Um diese Möglichkeiten zu erschließen, sind neue interdisziplinäre Ansätze erforderlich, um zu lernen, wie biologische Nanostrukturen gebaut sind, funktionieren und innerhalb von größeren biologischen Systemen interagieren. Es sind Analyse- und Manipulationswerkzeuge sowie Methoden zu entwickeln, um Bauteile zu schaffen, die aus biologischem und anorganischem Material bestehen. Diese Schnittstellen und Übergänge zwischen biologischen und anorganischen Systemen auf der molekularen Ebene zu verstehen, ist ein zentraler Schritt in diese Richtung.

1.1.2 Nanobionik

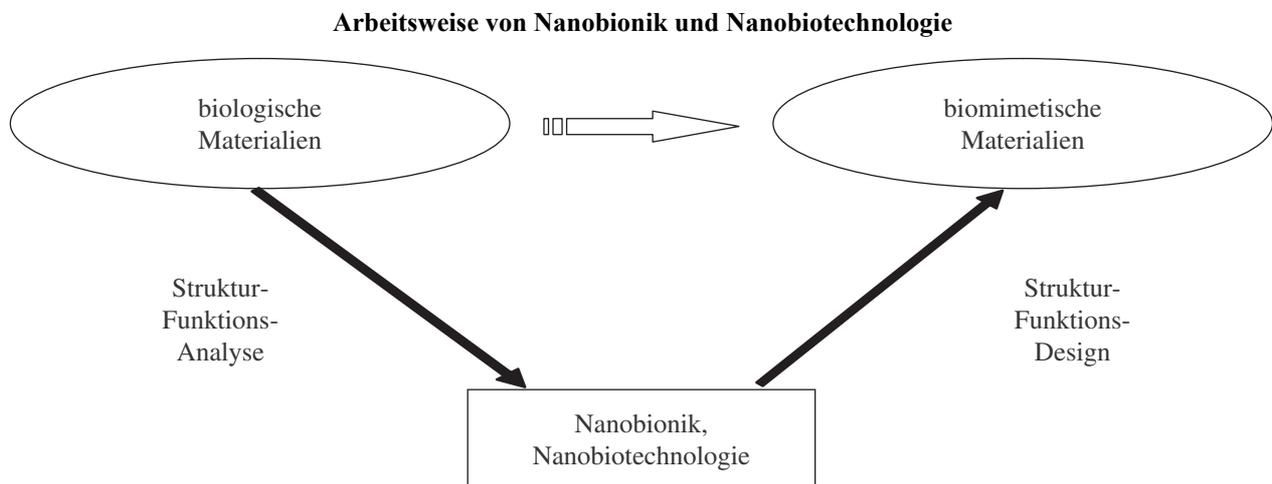
Vor diesem Hintergrund wurde der Begriff Nanobionik geschaffen: „Immer detailliertere Einblicke in die molekulare Funktion biologischer Makromoleküle ließen einen neuen Zweig der Bionik entstehen, die Nanobionik. Die erarbeiteten Prinzipien der Bionik kommen auf der Nanoskala erneut zur Anwendung, auf einer Skala, bei der die klassischen Grenzen zwischen Biologie, Chemie und Festkörperphysik verfließen“ (Hampp/Noll 2003). Dabei entsteht der Eindruck einer begrifflichen Gleichsetzung von Nanobiotechnologie (wenigstens in der Ausrichtung Bio2Nano) mit Nanobionik (Abb. 4). Danach verfertigen Nanobionik und Nanobiotechnologie biomimetische Materialien auf der Basis der Struktur- und Funktionsanalyse biologischer Materialien. Analog zu der Weise, wie lebende Systeme biologische Materialien

erzeugen, verfertigt die Nanobionik „biomimetische“, d.h. den biologischen Materialien nachgeahmte Materialien. Es ist der klassische bionische Schritt von der Struktur- und Funktionsanalyse lebender Systeme oder ihrer Bestandteile zum Design technischer Problemlösungen auf der Basis des damit erzeugten Wissens.

In diesem Sinne scheint die Gleichsetzung von Nanobionik und Nanobiotechnologie gerechtfertigt zu sein: In Anlehnung an die Nanotechnologie spricht man nicht von einer „Nanobiologie“, sondern von der Nanobiotechnologie (auch wenn sich die entsprechende Forschung hierzu noch weitgehend im Grundlagenbereich befindet), wodurch das Ziel der technologischen Nutzung des (Funktions- und Struktur-) Wissens bereits impliziert wird. Aus der Analyse von Elementen des Lebens für technische Anwendungen zu lernen – der Definitionskern der Bionik, vgl. Kapitel II.2 – trifft damit für die Nanobiotechnologie (im Sinne von Bio2Nano) generell ebenfalls zu.

In dieser Sicht verschwimmen klassische, wenn auch häufig unausgesprochene Grenzziehungen zwischen der Bionik und anderen Nutzungsweisen des Wissens über lebendige Systeme. So würde es schwer fallen, die Gentechnik nicht ebenfalls unter Bionik zu zählen. Auch hier geht es darum, aus der Analyse von Strukturen und Funktionen lebender Systeme entsprechendes Struktur- und Funktionswissen zu generieren, das dann zielgerichtet für menschliche Zwecke (z. B. der Erzeugung herbizidresistenter Nutzpflanzen) eingesetzt werden kann. Würde die Gleichsetzung von Nanobionik und Nanobiotechnologie (im Sinne von Bio2Nano) wohl noch von vielen Bionikern mit getragen (so kann man z. B. die Ausführungen in Nachtigall 2002, S. 122 ff. verstehen), so wäre bei der Einordnung der Gentechnik in die Bionik sicher mit erheblich größerer Zurückhaltung zu rechnen (dies hat auch mit der Frage nach den möglichen Risiken zu tun, vgl. Kap. V.1.3).

Abbildung 4



Quelle: Hampp 2005

1.1.3 Der englische Sprachraum

Im englischen Sprachraum ist die bereits in Kap. II.2 erwähnte, allerdings nicht streng durchgehaltene Unterscheidung zwischen „biomimetics“ und „bionics“ auch im Kontext der Nanobionik relevant. Zumeist wird in diesem Zusammenhang von Biomimetik gesprochen „With the recent developments of molecular and nanoscale engineering in physical sciences, and advances in molecular biology, biomimetics is now entering the molecular scale. By combining nature's molecular tools with synthetic nanoscale constructs, molecular biomimetics is emerging as a hybrid methodology“ (Sarikaya et al. 2003, S. 577). Das Ziel dieser Ansätze besteht vor allem in der Identifizierung und Nutzung der Funktions- und Strukturmechanismen der „bottom-up“-Produktionsprozesse, wie sie die Natur hervorgebracht hat. Hoffnungen auf eine naturgemäßere Technik mit weniger Risiken werden in diesem Kontext kaum geäußert (IÖW/GL 2005, S. 50).

Der Terminus „bionics“ ist gegenüber „biomimetics“ stark an der Prothetik orientiert: „Bionics (presently called hybrid systems) can be defined as augmenting or replacing operations and functions of human extremities through machinery controlled by neural systems“ (Bionics Symposium 1960). Bionics has also come to mean the application of knowledge of living organisms to the solution of engineering problems. The essential aspect of bionics was, at least at one time, considered by the military for advanced weaponry that combined the strengths of artificial mechanical systems with those of living human and animal brains“ (Johnson/ Schreuders 2003). Deutlich wird, dass der Begriff „bionics“ in starkem Maße auf „enhancement“ üblicher Körperfunktionen hin ausgerichtet ist.

Dies betrifft auch generell die Sicht auf zelluläre Prozesse. Zwar wird häufig auf die „Erfahrungen“ und die „Fähigkeiten“ der Natur im Umgang mit den molekularen Maschinen verwiesen. Diese Vorbildfunktion der Natur wird dabei jedoch nicht als bereits erreichtes Optimum aufgefasst, sondern als Ausgangspunkt für technische Verbesserungen der Natur unter menschlichen Zielsetzungen: „...it would be foolish to assume that nature has all the best ideas, which the engineer must then determine how to translate into workable solutions. The caricature of evolution in which nature explores all options and finds the best is still surprisingly pervasive. Nature has good reasons to avoid metallic components, for example, but this does not mean that human engineers should strive to do so“ (Ball 2001, S. 416). Auf diese Weise wird deutlich, dass im angelsächsischen Umfeld eine Einschätzung vorherrscht, nach der die Natur vielfältige Vorbilder und Material für technische Lösungen bietet, dass dieses Material aber jeweils einer „technischen Adaptation“ und der Optimierung auf menschliche Zwecke und Bedürfnisse hin bedürfen.

1.1.4 Nanobionik und die „konvergierenden Technologien“

Die Faszination der Nanobiotechnologie (und damit der Nanobionik), wie sie aus vielen spekulativen, aber auch

aus den zwar bescheideneren, aber immer noch hinreichend visionären Anwendungsideen (Kap. V.1.2) spricht, besteht zu einem guten Teil in der Konvergenz physikalischer, chemischer und biologischer „Welten“ auf der Nanoebene. Durch gezielte Ausnutzung der physikalischen Prinzipien, der chemischen Synthesemöglichkeiten und funktionaler Eigenschaften von biologischen Nanostrukturen soll es, so die Erwartung, gelingen, neue technische Funktionalitäten in bislang unerreichter Komplexität zu realisieren – letztlich dabei auch mit der Natur als Vorbild: „Nature has made highly precise and functional nanostructures for billions of years: DNA, proteins, membranes, filaments and cellular components. These biological nanostructures typically consist of simple molecular building blocks of limited chemical diversity arranged into a vast numbers of complex three-dimensional architectures and dynamic interaction patterns. Nature has evolved the ultimate design principles for nanoscale assembly by supplying and transforming building blocks such as atoms and molecules into functional nanostructures and utilizing templating and self-assembly principles, thereby providing systems that can self-replicate, self-repair, self-generate and self-destroy“ (Wagner 2005). Wissenschaftler und Ingenieure im Bereich der Nanobiotechnologie arbeiten daran, synthetische Materialien auf der Nanoebene zu entwickeln, mit dem Ziel, die molekulare Architektur biologischer relevanter Moleküle zu gestalten und zu einer Integration von biologischen und künstlichen Materialien zu kommen. Die „bio-inspirierte“ Synthese verbindet Prinzipien der molekularen Erkennung (recognition) und der Selbstorganisation, um biomimetische Nanostrukturen und -funktionen zu schaffen.

Eine über diese „instrumentelle“ Sicht hinausgehende und spekulative Perspektive auf die Nanobionik nimmt an, dass es durch technische Nachahmung der Funktionen der DNA möglich würde, einen zweiten Typ von Evolution zu begründen: „Another example is given by the ribosome present in each cell, which is actually a nano-assembly machine which reads the DNA and translates the code into protein. It works wonderfully in nature. The difficulty is to mimic the idea and to use it in practicable technology. This type of Nanobionic requires a second type of evolution. This evolution II is the whole idea of Nano“ (Heckl 2004). Diese „nanobionische“ Evolution wäre ein Evolutionsprozess, in welchem die „natürliche“ Evolution durch eine auf die vermeintlichen menschlichen Bedürfnisse bzw. industriellen Prozesse ausgerichtete Evolution „ersetzt“ werden soll. Deutlich wird in diesem Beispiel, dass sich in der Nanobionik weit reichende Gedanken, die ursprünglich aus der Gentechnikdebatte kommen, einen neuen Raum und neue Aktualität verschaffen (s. dazu auch WWF 1995).

1.2 Anwendungsgebiete

Nanobiotechnologie ist gegenwärtig noch weitgehend der Grundlagenforschung zuzuordnen. Mit konkreten Umsetzungen in Produkte oder Verfahren ist erst in größeren zeitlichen Abständen zu rechnen. Es sind jedoch weit reichende Anwendungspotenziale in unterschiedlichen Fel-

dem erkennbar. Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick gegeben, bevor die Beispiele der technischen Nutzung des Photosynthesepinzips und der Herstellung funktionaler Zellen vertieft behandelt werden.

1.2.1 Überblick

Zur Darstellung der potenziellen Anwendungsgebiete der Nanobionik ist es sinnvoll, von vorliegenden Überlegungen zur Nanobiotechnologie auszugehen und dann jeweils im Einzelfall zu beurteilen, ob und inwieweit ein bionischer Gedankengang zugrunde liegt. Wie in Kapitel II erläutert, sind pauschale Urteile in der Regel nicht möglich. In Deutschland wurden die Anwendungspotenziale der Nanobiotechnologie in zwei Studien des VDI-TZ erhoben (VDI 2002; VDI-TZ 2004). Weitere Darstellungen finden sich in Seeman/Belcher (2002), Ball (2001), Goodsell (2004), Jones (2004) sowie Sarikaya et al. (2003). Dabei wird zumeist die Unterscheidung von Nano2Bio und Bio2Nano zugrunde gelegt.

Im Bereich Nano2Bio – der für Nanobionik im Einzelfall relevant ist, jedoch nicht im Mittelpunkt liegt – stehen die Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Materialien für die Untersuchung biologischer Fragestellungen im Mittelpunkt. Anwendungsgebiete liegen vor allem im medizinischen Bereich, genereller in den Lebenswissenschaften. Hervorzuheben sind hier folgende Bereiche (dazu ausführlich TAB 2003):

- neue diagnostische Möglichkeiten, z. B. über Biosensoren, und Möglichkeiten des permanenten Monitoring des Gesundheitszustandes;
- zielgenaue Verfahren in Wirkstofftransport und -deposition („drug delivery“);
- neue biokompatible Materialien und Oberflächen (z. B. in der Prothetik, vgl. Kap. V.2).

Im Bereich Bio2Nano (der bereits von der Definition her eng mit bionischem Denken verbunden ist) lassen sich drei Ebenen von Anwendungsbereichen unterscheiden (IÖW/GL 2005):

- Nanofabrikation und Nanostrukturierung mit biobasierten Methoden: Ziel ist die Nutzung des Prinzips der Selbstorganisation molekularer Einheiten zu komplexeren Gebilden (Biomineralisation).
- Technische Nutzung funktioneller Biomoleküle und von Hybridssystemen: Es geht um den Einsatz der Funktionen isolierter Biomoleküle (z. B. von biomolekularen Motoren und Aktuatoren) in technischen Systemen oder in Kombination mit nicht biologischen Bauteilen (z. B. in Form des so genannten DNA-Computing, Kap. V.3).
- Konstruktion technisch-biologischer Schnittstellen: Hier geht es um die Realisierung von Schnittstellenfunktionen zwischen biologischen und technischen Materialien (z. B. für Neuroimplantate oder in der Prothetik).

Mit diesen Anwendungsfeldern und entsprechenden funktionalen Kombinationen können z. B. Biosensoren

und Biomembranen in der Umwelttechnik eingesetzt werden, oder es kann durch die Nutzung lichtenergetischer Prozesse die Photovoltaik biologisch unterstützt werden. Wie generell in der Nanobiotechnologie ist zur Realisierung dieser Potenziale erheblicher Forschungsaufwand und interdisziplinäre Kooperation erforderlich.

Inwieweit diese Anwendungen dann als bionisch bezeichnet werden können, wird von Einzelfall zu Einzelfall variieren. Im Allgemeinen ist der Gedanke des Wissenstransfers aus der Erforschung der Grundprinzipien und Bauplänen des Lebens zu ihrer technischen Nutzung kompatibel mit dem bionischen Gedankengang (Nachtigall 2002, S. 124). Vorstellungen evolutionärer Optimierung und von der Nutzung von Prinzipien der Selbstorganisation durchziehen auch die Nanobionik (IÖW/GL 2005; s.a. Universität Marburg 2005).

Da jedoch das „Leben“ dabei immer weiter in seine molekularen Bausteine zerlegt wird, um entsprechendes Wissen zu gewinnen, entfernt sich die Nanobionik weit von den ursprünglichen Vorstellungen, die einmal mit der makroskopischen Bionik und ihrer Orientierung an Organismen wie Vögeln, Haien oder der Klettpflanze verbunden waren, und wird zu einer molekularbiologisch arbeitenden High-Tech Bionik, deren Unterscheidung von der in den gleichen Feldern arbeitenden (Nano-) Biotechnologie zunehmend unscharf wird.

1.2.2 Beispiel biomimetische Energieerzeugung

Pflanzen und manche Bakterienarten sichern ihre Energieversorgung durch Photosynthese. Dabei wird das Sonnenlicht genutzt, um aus Kohlendioxid und Wasser komplexe Kohlehydrate zu synthetisieren, die dann sowohl der Energiespeicherung als auch der Energieversorgung dienen. Anders als die gegenwärtige Solarzellentechnik funktioniert dieses Prinzip auch bei diffusem oder sehr schwachem Lichteinfall. Das Photosyntheseprinzip, im Laufe der Evolution entstanden und „optimiert“, technisch zur Sicherung der menschlichen Energieversorgung zu nutzen, ist außerordentlich verlockend. Eine Energieversorgung auf der Basis dieses Prinzips wäre CO₂-neutral, würde leicht speicherfähige Energie bereitstellen, wäre dezentral realisierbar, praktisch unerschöpflich und würde keine problematischen Abfälle erzeugen. Es ist daher nicht überraschend, dass diese – typisch bionische – Lösungsidee eines gewaltigen Problems in der aktuellen Forschung vielfach bearbeitet wird. Bezeichnungen wie „Light Harvesting Complex“ oder „Protonenpumpe“ zeigen den „technischen“ Blick auf die Photosynthese an. Die Nanobiotechnologie liefert die erforderlichen Verfahren, um die natürlichen Vorgänge auf der molekularen Ebene zu verstehen und ggf. nachbauen zu können.

Ein Beispiel stellt die „biomimetische Lichtsammmlung“ dar (Balaban/Buth 2005). Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass sich – jenseits des gemeinsamen „Prinzips“ der Photosynthese – eine Vielzahl unterschiedlicher Lichtsammelverfahren in der Natur entwickelt haben, die auf jeweils verschiedene Bedingungen hin optimiert sind. Insbesondere die Licht sammelnden Vorrichtungen – die

„Antennen“ – unterscheiden sich, z. B. je nach verfügbarem Lichtangebot. Allerdings gilt: „Die Architektur des Chromophorproteinkomplexes der Pflanzen ist viel zu kompliziert, um in künstlichen lichtsammelnden Anordnungen nachgebildet zu werden“ (Balaban/ Buth 2005, S. 204). Daher konzentriert sich die Suche auf Nachbildungen der einfacheren Funktionsweise von Bakteriochlorophyllen. Synthetische Porphyrine, die eine strukturelle Ähnlichkeit zu den Bakteriochlorophyllen aufweisen, dabei aber robuster und leichter verfügbar sind, werden hierzu genutzt. Dabei wird auf das Prinzip der Selbstorganisation gesetzt, um die entsprechenden nanoskaligen Strukturen (Nanostäbe oder röhrenartige Strukturen) zu bilden (Balaban/Buth 2005, S. 206).

Es besteht die Hoffnung, dass derartige Forschungsarbeiten zur Entwicklung künstlicher Antennen beitragen können, die auch noch bei schwachem und diffusem Lichteinfall funktionieren. Sie könnten damit für das Design von Hybridsonnenzellen auf Basis kostengünstiger Kunststofftechnologien von Nutzen sein (Balaban/Buth 2005, S. 207). Entsprechende Forschungsarbeiten befinden sich jedoch noch sämtlich im Bereich der Grundlagenforschung. Es geht zunächst darum, wesentliche Prozesse in ihrem „technischen“ Funktionszusammenhang zu verstehen. Schemata der pflanzlichen photosynthetischen Membran z. B. existieren, es sind jedoch noch längst nicht alle relevanten Prozesse und Abhängigkeiten bekannt.

1.2.3 Beispiel künstliche Zellen

Die Erkenntnisse der Nanobiotechnologie können auch genutzt werden, um neue Funktionalitäten durch Modifikationen von natürlichen Biomolekülen, durch Modifikationen am Design von Zellen oder durch das Design von künstlichen Zellen zu erzeugen. Hier radikalisiert sich das bionische Denken in Richtung auf eine „Neuerfindung“ von Natur, auf die Schaffung von künstlichem Leben auf der Basis des Wissens über das „natürliche“ Leben.

Dieses Programm verfolgt die Synthetische Biologie (Ball 2005), um die Nanobiotechnologie systematischer voranzutreiben und die Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern. Bisher bestehen erhebliche Schwierigkeiten, biomimetische Lösungsansätze systematisch für technische Problemlösungen nutzbar zu machen: „There is furthermore a grey area where biomimesis merges with bioengineering – where the pre-existing nanoscale devices and structures of the cell can be adapted to suit technological goals“ (Ball 2005, S. R1). Synthetische Biologie differenziert zwischen einer Ausrichtung, die künstliche Moleküle nutzt, um emergentes Verhalten aus der Biologie zu reproduzieren, und einer Ausrichtung, die Teile aus der „natürlichen“ Biologie nutzt und sie quasi neu zu Systemen zusammensetzt, die in nicht „natürlicher“ Weise funktionieren (Benner/Sismour 2005). Der Gedanke der Erzeugung künstlichen Lebens (Artificial Life, AI) oder eines technisch modifizierten, teils mit neuen Funktionen ausgestatteten Lebens steht hier Pate: „how far can it [life] be reshaped to accommodate unfamiliar materials, circumstances and tasks?“ (Ball 2005, S. R3). Beispiele

für diese Bemühungen reichen vom Design künstlicher Proteine über die Virusnachbildung bis zu Ansätzen der Zellprogrammierung (Ball 2005; Benner/Sismour 2005, S. 534-540).

Zellen werden dabei als Maschinen interpretiert, bestehend aus Bauteilen: „Dem Maschinenparadigma folgend, werden Proteine und Botenmoleküle als Bauteile begriffen, die der Mensch beliebig verändern oder einfügen kann“ (Boeing 2006). Ganz in der Tradition des Standardisierungsdenkens im Maschinenbau wurde bereits das „MIT-Verzeichnis biologischer Standardteile“ begründet. Dort sind zurzeit 2109 Gensequenzen als Vorlagen für verschiedene Zellmaschinenteile gespeichert (Boeing 2006). Mit dem gezielten Design von künstlichen Zellen auf der Basis solcher Bauteile sollen Mikromaschinen erzeugt werden, die z. B. Informationen verarbeiten, Nanomaterialien herstellen oder medizinische Diagnosen vornehmen können.

Dabei wird teils nicht nur – wie in der klassischen Maschinenbautradition – Bauteil für Bauteil nach einem top-down entworfenen Bauplan zusammengesetzt, um ein funktionsfähiges Ganzes zu erhalten. Sondern es gibt auch Ansätze, Prinzipien der Evolution zu nutzen, um bestimmte neue Effekte zu erreichen. So können z. B. Zellen einem „Evolutiondruck“ ausgesetzt werden, indem bestimmte Gensequenzen „ausgeschaltet“ werden, die für den Aufbau bestimmter Aminosäuren zuständig sind. Durch Zugabe von chemischen Substanzen, die der dann fehlenden Aminosäure chemisch hinreichend ähnlich sind, kann die Zelle dazu gebracht werden, die Substitute anstelle der Aminosäuren zu verwenden. Ergebnis ist dann eine Zelle mit veränderten Eigenschaften.

Entscheidend ist bei diesen Ansätzen die Kombination gentechnischen Wissens und der neuen Möglichkeiten der Nanotechnologie. Zurzeit ist dieses Feld im Stadium des systematischen Erkennens und Versuchens und damit noch weit von möglichen Umsetzungen entfernt. Voraussetzung für das zielgenaue Design künstlicher Zellen wäre ein (hinreichend) vollständiges Verständnis aller erforderlichen subzellulären Prozesse und Wechselwirkungen. Der gegenwärtige Wissensstand ist hiervon noch deutlich entfernt; Forschung und Entwicklung in der synthetischen Biologie dient zu großen Teilen der Vervollständigung dieser Wissensbasis durch Manipulationen von Zellbestandteilen.

1.2.4 Nanobionik als technisierung der Natur?

Dass das Verhältnis zwischen Natur und Technik in der Bionik komplexer ist, als es die einfache These der technischen Nachahmung der Natur nahe legt, wurde bereits in Kapitel II.3.3 angesprochen. In der Nanobionik finden sich dafür besonders eindrucksvolle Beispiele. Der „technische Blick“ auf das Leben spiegelt sich in einer Fülle von Formulierungen wider, in denen die Zelle und ihre Bestandteile als molekulare Maschinen gekennzeichnet werden. Um die Funktionsprinzipien der Zelle zu verdeutlichen, werden Analogien zu bestehenden und vertrauten technischen Artefakten hergestellt (Tab. 6).

Tabelle 6

Analogien technischer und molekularer Maschinen

technische Maschinen	molekulare Maschinen
Fahrzeuge	Hämoglobin
Assembly lines	Ribosomen
Motoren, Generatoren	ATP-Synthese
(Bahn-)Schienen	Netze aus Aktin-Filamenten
Zugleitstellen	Centrosom
digitale Datenbasen	Nukleosom
Kopiermaschinen	Polymerasen
Bulldozer, Zerstörer	Proteasen, Proteosome
Briefsortiermaschinen	Protein sortierende Maschinen
elektrische Zäune	Membranen
Tore, Schlüssel	Ionen-Kanäle
Internetknoten	Synapsen von Neuronen

Quelle: IÖW/GL 2005 und Zhang 2003, verändert

Bionik und Biomimetik sind danach durch eine Ambiguität gekennzeichnet: Einerseits gilt die Natur als Vorbild, von der man im Hinblick auf die (molekularen) Nanomaschinen lernen könne, auf der anderen Seite wird die Technik als Vorbild für die Beschreibung der Natur genutzt und die Anpassung der Natur (oder der Nanomaschinen) an die Bedarfe der industriellen Produktion gefordert. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass die Natur, die zum Vorbild genommen wird, im Kontext der Nanobiotechnologien selbst technisiert wird: „Die Natur ... baut funktionelle, hochkomplexe >Maschinen< im molekularen Größenbereich“ (Nachtigall 2002, S. 125). Am Beispiel der Bakteriengeißel erläutert Nachtigall das dort realisierte technische Prinzip der Rotation. Dabei finden Begriffe wie „Miniaturkugellager“, „Maschinenteile“ und „Nanorotationsantriebe“ Verwendung. Besonderes Interesse gilt der Energieversorgung solcher „Maschinen“.

Bereits 1981 hat Drexler (nach Bensaude-Vincent 2004) diesen Blickwechsel gewählt, indem er Funktionen bekannter Techniken darstellt und diesen Funktionen Beispiele von Zellen oder Organismen gegenüberstellt und dadurch schließlich die biologische Welt als Maschine interpretiert. In diesem Sinne wäre auch die kontrovers diskutierte Idee von „Nanorobotern“ letztlich als eine bionische Idee einzuordnen: Erzeugung künstlicher Lebewesen auf der Basis von Wissen, das an natürlichen Lebewesen und ihren Bestandteilen (z. B. Viren) gewonnen wurde. Die ursprüngliche Idee der an makroskopischen Organismen (z. B. Vögel und ihre Flugbefähigung)

orientierten Bionik und die Bionik „als Versprechen“ (Kap. II.2.3) erscheinen hier weit entfernt.

1.3 Chancen und Risiken

Chancen und Risiken nanobionischer Entwicklungen lassen sich angesichts des frühen Entwicklungsstadiums nicht konkret thematisieren. Gleichwohl sind einige verallgemeinernde Aussagen auf der Basis bisheriger Erfahrungen möglich.

Mit der Nanobiotechnologie sind zweifelsohne deutliche Umweltentlastungen perspektivisch möglich (Kap. V.1.2.3). Chancen liegen ebenso im Bereich der Gesundheit und in der Diagnose und Behandlung von Krankheiten. Wirtschaftliche Potenziale sind, gemäß der Bedeutung dieser Anwendungsfelder, damit sicher ebenso zu erwarten, auch wenn diese sich noch in keiner Weise beziffern lassen. Vor allem aber ist die Nanobionik (oder die Nanobiotechnologie allgemein) zurzeit ein faszinierendes Forschungsfeld, in dem, durch die wechselseitige Überschreitung der bisher unüberwindlichen Grenzen zwischen Technik und Lebendigem, vielfältige Erkenntnisse, Neuerungen und Überraschungen zu erwarten sind.

Die Möglichkeiten, die sich mit der Entwicklung der Nanobiotechnologie ergeben können, sind so weit reichend, dass auch sorgfältig über Risiken nachzudenken ist (EU 2004). Dabei ist zunächst zu bedenken, dass Nanobiotechnologie eng mit den Biotechnologien generell verbunden ist. Eine Trennung der Risikopotenziale

der Gentechnik und der Nanobiotechnologie ist von daher kaum möglich (IÖW/GL 2005, S. 54). Edwards (2005) stellt in diesem Sinne fest, dass „[t]he green goo scenario, somewhat more likely, if only because it is more easily in reach, suggests that a DNA-based artificial organism might escape from the lab and cause enormous environmental damage“. Diese potenziellen Risiken entsprechen letztlich denen der Gentechnik, bei denen allerdings bereits seit einiger Zeit Erfahrungen mit Strategien des Containment und der kontrollierten Freisetzung vorliegen (Sauter 2005). Auch andere Befürchtungen, die etwa mit dem „Wandern“ von genetischen Manipulationen und deren Folgen zu tun haben, sind nicht spezifisch für die Nanobionik.

Die Komplexität der molekularen biologischen Vorgänge stellt ebenfalls ein Einfallstor für mögliche Risiken dar: „A more concrete rationalisation of this distrust is the feeling that unpredictable consequences can follow from rearranging a complex system that is not fully understood. The recent history of gene therapy offers us a cautionary tale. To introduce genes into patients, it has been necessary to use what is essentially a piece of nanotechnology – an adapted virus is used to introduce the new genetic material into the cell. But fatalities have occurred due to unexpected interactions of the viral vector with the cell“ (Jones 2004, S. 214 ff.).

Weiterhin ist daran zu erinnern, dass auch die Berufung auf die Millionen Jahre währende Evolution ambivalent ist. Soll sie Vertrauen in die bionischen Lösungsvorschläge auslösen („optimiert in Jahrmillionen“), so schickt sich nun der Mensch an, etwa im Bereich der Erzeugung künstlichen Lebens (Kap. V.1.2.3), diese Evolution in wenigen Jahren oder Jahrzehnten selbst in die Hand zu nehmen: „Ponder for a moment the incredible hubris of the entire endeavour of bionanotechnology. The natural environment has taken billions of years to perfect the machinery running our bodies and the bodies of all other living things. And in a single generation we usurp this knowledge and press it to our own use“ (Goodsell 2004, S. 309). Ähnlich wie in der Debatte zur Grünen Gentechnik, in der die Gentechnik teilweise als effizientere Art der Züchtung dargestellt wurde, und diese selbst wiederum als „evolutionäres“ Fortschreiten, Schritt für Schritt, mit der Möglichkeit frühzeitiger Fehlererkennung und -ausmerzung, so erscheint auch hier die gewaltige Beschleunigung der natürlichen Entwicklung durch den Einsatz der Nanobionik als die große Herausforderung unter Risikoaspekten. Sind künstliche Zellen im Umlauf, so haben sie, auch wenn sie auf an natürlichen Zellen gewonnenem Wissen beruhen, keine Millionen Jahre lange Evolution hinter sich, sondern möglicherweise nur einige Jahre des Experimentierens im Labor. Die Neukonstruktion von Zellen oder die Umprogrammierung von Viren bedürfen hier besonderer Beobachtung.

Neben der unbeabsichtigten Freisetzung ohne Rückholmöglichkeit ist auch an die Möglichkeit der Konstruktion neuartiger biologischer Waffen auf der Basis neu konstruierter oder veränderter Zellen zu denken. Dabei zeigt sich auch die Ambivalenz des Verweises auf die Potenziale

der Selbstorganisation. Werden damit vor allem positiv besetzte Fähigkeiten lebender Systeme bezeichnet (Kap. II.3), so stellen die Selbstorganisationsfähigkeit und die Selbstreplikationsfähigkeit lebender Systeme auch ein Bedrohungspotenzial dar. Wie die Debatte um das „grey goo“-Szenario in der Nanotechnologie gezeigt hat, können hier positive Visionen rasch in das negative Gegenteil umschlagen: In diesem Beispiel wurde die Vision der Schaffung von Nanorobotern für eine Vielfalt positiver Ziele von der Befürchtung abgelöst, dass gerade wegen der Selbstorganisationsfähigkeit dieser Nanoroboter ein Kontrollverlust des Menschen drohe und letztlich „die Zukunft uns nicht mehr brauche“ (Joy 2000). Der bionische Gedankengang zeigt hier ein tief greifendes inhärentes Risiko: Lebende Systeme können in dramatischer Weise anders aus der Kontrolle geraten als klassische technische Systeme.

Häufig wird zutreffend darauf verwiesen, dass die Wahrscheinlichkeit gering sei, dass die künstlichen Systeme in der natürlichen Welt überleben – und dann Schaden anrichten – können. Eine geringe Wahrscheinlichkeit ist aber dennoch eine endliche Wahrscheinlichkeit, weswegen Probleme dieser Art einer sorgfältigen Beobachtung bedürfen. Deutlich wird vor diesem Hintergrund, dass das Leitbild der Bionik in den molekularen Kontexten ggf. neu interpretiert werden bzw. konkretisiert werden muss. Für das Selbstverständnis der Bionik und dem vielfach damit verbundenen normativen Leitbild (Kap. II.2.3) entsteht aus dem Zusammenwachsen von Biotechnologie, Gentechnologie und Nanotechnologie und angesichts der neuen Möglichkeiten einer synthetischen Biologie eine ernsthafte Herausforderung.

2. Neurobionik und Prothetik

Interessant und widersprüchlich zugleich ist die Frage, ob bzw. inwieweit Nachbildungen lebender Systeme oder ihrer Teile – und damit auch Prothesen – zur Bionik gerechnet werden können. Der Begriff „Bionik“, in der Verwendung von J. E. Steele 1958 (Kap. II.2.1), schließt genau diese Nachbildung ein. Andererseits wird heute von den meisten Bionikern in Deutschland die Prothetik nicht wirklich als Teilgebiet der Bionik anerkannt. Da es jedoch immer mehr Forschungsarbeiten im Rahmen der Prothetik gibt, die bionische Bezüge aufweisen, soll auf diesen Grenzbereich explizit eingegangen werden. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf das Gutachten IÖW/GL (2005).

2.1 Begriffliche Bezüge und Aspekte zur Einordnung

Bionik im Zusammenhang mit dem menschlichen Körper zu betrachten bedeutet, einen Grenzbereich zu betreten. Materialeitig wird im Zusammenhang mit bionischen/biomimetischen Materialien zwar explizit auch von medizinischen Materialien gesprochen. Dennoch verbinden sich hier gemachte Fortschritte nicht zwingend mit Anwendungen „direkt am Menschen“.

Eine Prothese ist der künstliche Ersatz für ein menschliches Körperteil, der in seiner Funktionsweise das zu ersetzende Teil nachahmt. Befindet sich die Prothese außer-

halb des Körpers, spricht man von einer Exoprothese (wie z. B. bei künstlichen Gliedmaßen), andernfalls von einer Endoprothese oder einem Implantat. Das Ziel der Prothetik ist die Wiederherstellung von eingeschränkten oder verloren gegangenen Körperfunktionen. Spannend und bisher weitestgehend unbefriedigend gelöst ist „die konkrete Anbindung“ der Prothese an das Nervensystem des Menschen.

Neurobionik

Der Bereich der Neurobionik⁴⁶ kann eingeteilt werden in die Neuroprothetik, in Biohybridelemente und in „Rechenverfahren“, mit denen die Natur Informationsverarbeitung betreibt. In diesen Bereichen hat es in den letzten Jahren durch das zunehmende Verständnis der biologischen Elemente sowie den technischen Fortschritt im Bereich Miniaturisierung und Materialien enorme Fortschritte gegeben (Luksch 2005). Daher ist zu erwarten, dass die Neurobionik in den kommenden Jahren eine klarere Rolle in der bionischen Forschung beanspruchen wird als bisher. Der Bereich der Neurobionik wird durchaus kontrovers diskutiert. Die Gründe dafür sind vielfältig. Sie lassen sich u. a. auf das Unbehagen des Menschen zurückführen, technische Eingriffe in das menschliche Gehirn zuzulassen (z. B. für die „Ansteuerung“ von Prothesen bzw. Implantaten).

Eine klare Definition der Neurobionik ist bislang nicht gegeben. Ausgehend von der Grundidee der Bionik als „Lernen von der Natur für eigenständiges technisches Handeln“ (W. Nachtigall) sollte neurobionische Forschung die Grundlagen und Prinzipien neuronaler Informationsverarbeitung untersuchen und daraus Anregungen für die Implementierung technischer Systeme in Robotik und Automatisierung ableiten. Allerdings wird in der öffentlichen Wahrnehmung Neurobionik primär mit Neuroprothetik assoziiert (Luksch 2005).

Die Neurobionik wird von vielen Bionikern unter originär bionischen Gesichtspunkten gesehen solange es um das Lernen von der Natur mit Blick auf evolutionäre Aspekte geht (Kap. II.3.1) sowie um das Umsetzen in neue technische Anwendungen. Das „Pausen“ der Natur für einen „nicht wirklich guten Nachbau“ (als Prothese bzw. Implantat) wird in diesem Zusammenhang eher abgelehnt (Kap. II.3.3), auch wenn für eine bessere, effizientere Anbindung von Prothesen an das menschliche Nervensystem Erkenntnisse und deren Anwendung aus der Funktions-

weise von menschlichen Extremitäten und Sinnesorganen eine notwendige Basis darstellen. Hinter dem Einsatz von Prothesen steht ein komplexes, multikriterielles Anforderungsprofil, wobei eine „1:1-Kopie“ vermutlich nicht praktisch umsetzbar sein wird, sondern eher eine „technische Analogie“ der internen Informationsübertragung (Reizweiterleitung) darstellen würde. Dennoch grenzen sich viele Bioniker von der Neurobionik für prothetische Anwendungen ab, da diese mehr auf den „Ersatz von Sinnen“ ausgerichtet ist und weniger auf der Evolution beruhende Erkenntnisse verarbeitet.

Auswahl dokumentierter Begriffe und Bezüge

Derzeit gibt es keine einheitliche Verwendung von Begrifflichkeiten in Bezug auf Bionik und den menschlichen Körper. Medizingeschichtlich versuchen Ärzte und Wissenschaftler schon seit Jahrtausenden, ge- oder zerstörte körperliche Funktionen durch künstliche Nachbildungen der betroffenen Körpereinheiten wieder herzustellen. Hierzu zählen die ersten Prothesen ägyptischer Ärzte genauso wie moderne Herzschrittmacher und künstliche Hüftgelenke, die von einer Reihe von Medizintechnikhistorikern als „bionic engineering“ bezeichnet werden (Gaggioli et al. 2003).

Andererseits sind auch Bezüge dokumentiert zur sog. Anthropotechnik, die die Anpassung von Maschinen an den Menschen und seine Bedürfnisse, die für Nachtigall (2002, S. 287) eine der „vornehmsten Forschungsaufgaben auf dem Gebiet einer erweiterten Bionik“ darstellt. Im Sinne der Anthropotechnik⁴⁷ fasst Nachtigall die bionischen Bezüge sehr weit: Entwicklungspriorität hat in seinem Verständnis die Anpassung der Technik an die Funktionsweise des Menschen. Die Verbindung zur Bionik wird von Nachtigall insofern hergestellt, als die Entwicklung von an den Menschen angepasster Technik das Verständnis des biologischen Systems „Mensch“ voraussetzt. Das gleiche Prinzip gilt für ihn auch hinsichtlich der Entwicklung von künstlichen Hüftgelenken, Prothesen, Retina- und Cochleaimplantaten sowie die Verknüpfung von lebenden Zellen mit künstlichen Schaltkreisen (IÖW/GL 2005). Zur ethischen Dimension der „Mensch-Maschine-Fusion“ stellt Nachtigall fest, dass jede Maßnahme gerechtfertigt sei, so lange sie „einem schwer behinderten Menschen ein Stückchen Lebensqualität zurückgibt“ (Nachtigall 2002, S. 287).

Enger fassen Herr et al. (2003) den Bezug der Prothetik zur Bionik. Für sie ist die Entwicklung biomimetischer Kontrollschemata zur Steuerung exogener Prothesen, die sich wie Muskeln verhalten, Voraussetzung zur Entwicklung von Prothesen. Ihre Verwendung des Begriffs „biomimetisch“ ist dabei stellvertretend für eine Vielzahl von Verwendungsweisen in der technisch orientierten Literatur im Feld Prothetik. Biomimetisch steht dabei – zumeist undiskutiert – für das Verstehen und Umsetzen (nicht un-

⁴⁶ Der Begriff „Neurobionik“ ist – in Bezug zur Prothetik – in Deutschland Anfang der 1990er Jahre von einigen Neurochirurgen geprägt worden. Er beschreibt den Einsatz von Technik in der Medizin zur Kontaktierung von Nerven. Nach Fortschreiten der technischen Entwicklung und dem Auftreten von Produkten zur Elektrostimulation von Patienten zu Therapie und Diagnose ist seine Verwendung relativ schnell wieder zurückgegangen. Heute noch existent ist die internationale Stiftung Neurobionik mit Sitz in Hannover (Stieglitz/Rosahl 2005). Forschungsseitig wird der Begriff „Neurobionik“ heute weiter gefasst. Er integriert die Weiterentwicklung von Informationsverarbeitung und Steuerung (z. B. durch intelligente Schaltungen, die Verschaltung von Parallelrechnern und Neuronale Schaltkreise) ausgehend von Anregungen aus dem Bereich der Neurobiologie und biologischen Kybernetik (IÖW/GL 2005).

⁴⁷ Als Beispiele nennt er etwa die Entwicklung von Automobilen der Zukunft, die eine „biomechanisch angepasste Optimalhülle“ für das „biomechanische System Mensch“ darstellen (Nachtigall 2002, S. 288). So soll beispielsweise die Konstruktion von Autoinnenräumen optimal auf das Verhalten des menschlichen Körpers im Falle eines Auffralles angepasst sein (IÖW/GL 2005).

bedingt 1:1 kopieren) der Funktionsweisen des menschlichen Körpers. Dem entspricht auch die Verwendung des Begriffs von Bar-Cohen (2005), der nicht zwischen Bionik und Biomimetik unterscheidet; er versteht Bionik als Kopieren, Imitieren und Lernen von der Biologie und sieht Prothetik als ein Anwendungsfeld dieser Erkenntnisse (IÖW/GL 2005, S. 74).

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) zählt explizit die „bionische Prothetik“ zu den Feldern der Bionik und nennt als Unterkategorien die „Funktionsoptimierung von Prothesen, einwachsende Prothesen und Verbesserung der Verträglichkeit“ (VDI 1993, S. 15). Auch die European Space Agency führt in ihrer Übersicht zum Thema Biomimicry die Entwicklung künstlicher Muskeln (im Sinne einer Entwicklung von Materialien und Mechanismen zur Übernahme muskulärer Funktionen) auf (Ayre 2004). Klassische Prothesen sowie Cochlear Implantate und künstliche Retinas sind jedoch nicht explizit benannt.

Firmen mit prothetischen Produkten ordnen sich teilweise relativ eindeutig der Bionik zu. Zum Beispiel plant die Firma Vichom-Human Bionics die Entwicklung künstlicher Exo-Muskeln, die innerhalb von Prothesen Muskelfunktionen übernehmen sollen. Einer der größten Produzenten von Cochlea-Implantaten, nennt sich Advanced Bionics. Das Unternehmen unterhält eine Vereinigung für Cochlea-Patienten und -Ärzte, die den Namen Bionic Ear Association trägt (IÖW/GL 2005, S. 75).

Sieht man die aufgeführten Begriffseingrenzungen und historischen Entwicklungen in einem historischen Kontinuum, dann waren frühe Prothesen in zurückliegenden Phasen zwar von den natürlichen Gliedmaßen inspiriert (oft auch in Analogie zum Original gefertigt), aber sie waren oft relativ weit weg vom Original (Stock als Beinprothese, Haken als Hand etc.). Mit zunehmender wissenschaftlicher Erkenntnis wurden diese deutlich verbessert. Dies entspräche in etwa der Begriffsverwendung des VDI mit seiner Betonung der inkrementellen Verbesserung. 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 vereinfachten, zweckmäßigen Analogie das Ziel einer komplexeren „Kopie bzw. Imitation“ (z. B. vergleichbar mit dem Ziel des „perfekten Armes“). In der praktischen Entwicklung von Prothesen lassen sich somit Analogie und Kopie nicht klar voneinander trennen (IÖW/GL 2005).

Angrenzende Bereiche

Als einen angrenzenden Bereich könnte man die Gewebezüchtung auffassen.⁴⁸ Sie spielt jedoch in der Bionik-Community nur am Rande eine Rolle. Teilweise wird sie

⁴⁸ Gewebezüchtung wird hier aus zwei Gründen thematisiert: Erstens wird der Einsatz von Nanotechnologie hier bereits jetzt breit diskutiert, so dass Gewebezüchtung als eine Art Vorstufe zum Themenkomplex Nanotechnologie/Nanobiotechnologie gesehen werden kann. Zweitens werden am Beispiel Gewebezüchtung die Probleme beim Kopieren von der Natur deutlich. Letztendlich strebt die Gewebezüchtung ein Verständnis der natürlichen Prozesse zur Reproduktion von ganzen Körperteilen mit all den damit verbundenen Chancen und Risiken an (IÖW/GL 2005).

implizit in Übersichtsdarstellungen mitgeführt wie z. B. in einer aktuellen Broschüre des BMBF zur Bionik in einem Unterkapitel zu Menschen und Material, wo die Prinzipien des Knochenwachstums als Vorbild für die Entwicklung von Hartgewebeimplantate genannt werden (BMBF 2005c).⁴⁹ Der Bereich der Gewebezüchtung soll hier zunächst nicht weiter verfolgt werden.⁵⁰

Bei der Entwicklung von Prothesen ist ein zentraler Punkt, die Signale vom Gehirn zur Prothese zu lenken und umgekehrt. Werden Signale vom Gehirn zu einem Computer gelenkt, spricht man auch von Brain-Computer-Interfaces (BCI). Es ist davon auszugehen, dass neue Entwicklungen im Bereich der neuronalen Steuerung in prothetische Anwendungen einfließen können. Das trifft insgesamt auch auf das breiter fassbare Themenfeld „Schnittstelle Mensch – Maschine“ oder auch „Biologie – Maschine“ zu, welches zunächst nicht weiter separat ausgeführt werden soll.

Ein weiteres Forschungsfeld ist das der Mechatronik (auch Biomechatronik). Es verbindet interdisziplinär erzielte Ergebnisse aus dem Maschinenbau, der Elektronik und der Informatik, um die Leistungsfähigkeit klassischer Systeme zu verbessern und um vollständig neue Funktionen zu realisieren. Aktuelle Entwicklungen sind gekennzeichnet von einer zunehmenden Komplexität, wobei sich diese in technischen Systemen mehr und mehr der Natur annähert. Die damit eng verbundene Frage, ob der Bereich biologisch-technischer Interaktion bzw. Schnittstellen (Bioelektronik oder Biomikromechanik), die direkt die Verknüpfung biologischer und technischer Strukturen auf der Mikroebene betreiben, zur Bionik gehört oder nicht, bleibt kontrovers. Im Themenfeld „Schnittstelle Mensch/Biologie/Maschine“ gibt es beispielsweise Arbeitsgruppen an der TU Ilmenau (Institut für Mikrosystemtechnik, Mechatronik und Mechanik; FB Biomechatronik, Prof. Dr. Hartmut Witte; Themengebiet: Bionik und Mechatronik für das Biomedical Engineering; Bionisch inspirierte Robotik) (Biokon 2005b; TU Ilmenau 2005) und an der TU Darmstadt (Biotechnik-Zentrum Darmstadt, Dr. Torsten Rossmann; Themengebiet: Bionischer Roboterarm) (Biokon 2005b; Bitz 2005; UMSICHT 2005, S. 53). Das Themenfeld Biomechatronik wird hier zunächst auch nicht weiter ausgeführt. Ergänzend ist das Themenfeld Robotik zu nennen, welches auf der Analyse

⁴⁹ Für das BMBF fällt Gewebezüchtung unter das Thema „Regenerative Medizin“.

⁵⁰ Auch in diesem Bereich gibt es unterschiedliche Auffassungen, inwieweit eine Zuordnung zur Bionik nachvollziehbar ist. Im U.S.-amerikanischen National Institute of Dental and Craniofacial Research (NIDCR) werden Biomimetics und Tissue Engineering explizit in Zusammenhang gebracht. Demnach ist Biomimetics 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). Einen direkten Zusammenhang von Gewebezüchtung und Bionik stellen auch Firmen über ihre Produkte her. So zählt die Firma Dentigenix, die die Züchtung von ganzen Zähnen und Zahnschmelzkomponenten beabsichtigt, biomimetische Methoden als Teil ihrer Entwicklungsverfahren auf, ohne sie weiter zu beschreiben. Das Unternehmen Biomimetic Pharmaceuticals, das Gewebe zum Ersatz von beschädigten Knochen zu züchten plant, stellt den Bezug bereits im Firmennamen her. Die Liste ließe sich fortsetzen (IÖW/GL 2005).

der natürlichen Bewegungen aufbaut. Eine potenzielle Anwendung läge hier z. B. in einem Datenhandschuh für Arbeiten unter Wasser (für Montagearbeiten in 10 000 m Tiefe), der wie eine menschliche Hand funktioniert.

2.2 Ausgewählte prothetische Anwendungen

Mit den heute verfügbaren Prothesen und Implantaten ist das Ziel der Prothetik – die Wiederherstellung von eingeschränkten oder verloren gegangenen Körperfunktionen – zwar partiell, jedoch noch nicht umfassend erreicht. In diesem Bereich gibt es eine breite medizinische Forschung sowie eine entsprechende Dokumentation der Funktionsweise einzelner Prothesen und des aktuellen Standes der Forschung (VDE 2005). Im Folgenden sollen daher nur exemplarisch einige Anwendungsbereiche herausgestellt werden, wobei der bionische Bezug im Vordergrund stehen soll.

Historische Hinweise für die Konstruktion und Applikation von Prothesen finden sich bereits lange vor Beginn der christlichen Zeitrechnung. Historisch gesehen stand zunächst die Entwicklung von Exoprothesen im Vordergrund (z. B. Bein-, Zahnersatz); im Zuge der technischen Entwicklung nahm die Bedeutung von Endoprothesen zu. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden erste künstliche Hüftgelenke eingesetzt, die erste künstliche Herzklappe wurde 1951 und das erste künstliche Herz 1982 implantiert. Mit der Zunahme des Wissens nahmen auch die Komplexität der Prothesen und damit auch die Zahl der beteiligten Disziplinen an der Entwicklung von Prothesen zu (IÖW/GL 2005, S. 74 f.). Das zunehmende Verständnis des Nervensystems im 20. Jahrhundert erlaubte es nachfolgend, einen direkten Zugriff auf die peripheren und zentralnervösen Bestandteile des Nervensystems vorzunehmen und dadurch einerseits zerstörte Sinnesepithelien zu ersetzen und andererseits eine unmittelbare An-

steuerung mechanischer Prothesen zu erzielen (Luksch 2005).

Nach dem zweiten Weltkrieg wurden die Veteranenkrankenhäuser systematisch in die Forschung von medizinischen Forschungseinrichtungen eingebunden. In diese Zeit fallen auch die ersten Untersuchungen der menschlichen Fortbewegung (Lokomotion) zur Verbesserung von Prothesen. Auch heute noch ist zum Beispiel in den Vereinigten Staaten das Ministerium für die Angelegenheiten der Veteranen (Department of Veteran's Affairs, VA) eins der wichtigsten Akteure bei der Weiterentwicklung von Prothesen (Bristol 2005).

Zentral ist bei verschiedenen Anwendungen (trotz unterschiedlicher technischer Prinzipien), dass in allen Fällen das Prinzip der neuronalen Steuerung eine Rolle spielt. Dies beruht auf der Tatsache, dass es Ähnlichkeiten bei der Informationsübertragung zwischen Neuronen und elektronischen Bausteinen gibt. Elektronische Bausteine transportieren Information als Stromstöße in Form von Elektronen, die sich in Metallleitern fortbewegen; Neuronen transportieren Information als Stromstöße in Form von Ionen, die sich in Wasser bewegen. Aus diesem Grund wird angenommen, dass es über die richtigen Schnittstellen möglich sein sollte, mit elektronischen Bausteinen neuronale Aktivität aufzuzeichnen und anzuregen.

2.2.1 Ausgewählte Akteure

Akteure im Bereich der Prothetik, die aus industrieller Sicht einen bionischen Bezug aufweisen, sind in Tabelle 7 aufgeführt. In Bezug auf Forschungsarbeiten in FuE-Einrichtungen sei im Zusammenhang mit Akteuren auf den Anhang 1 verwiesen. Dort wird die Prothetik zwar nicht separat aufgeführt, jedoch findet sich eine Reihe von Einrichtungen, die im medizinischen sowie in

Tabelle 7

Akteure im industriellen Bereich (Auswahl)

Unternehmen	Themengebiet/Produkt	Quelle
Advanced Bionics, Sylmar, USA	„bionic ear“; Cochlea-Implantate (implantierbare Hörhilfen)	Advanced Bionics 2005
Chendo GmbH, Saalstadt	trabekulär orientierte Endoprothesensysteme (bionisches Dämpfungssystem)	Chendo 2005
Cochlear Headquarters, Lane Cove, Australien	Cochlea-Implantate (implantierbare Hörhilfen)	Cochlear 2005
MED-EL Worldwide Headquarters, Innsbruck, Österreich	Cochlea-Implantate (implantierbare Hörhilfen)	MED EL 2005
Össur Europe, Pulheim (Stammsitz Island)	bionische Prothesen	Össur 2005
Otto Bock HealthCare GmbH, Duderstadt	bionische Armprothese	Otto Bock 2005, Hamburger Abendblatt 2005
Phonak Gruppe, Stefa, Fellbach (Hauptsitz Schweiz)	Hörgerätelinie Savia, Chiptechnologie, die Fähigkeiten von biologischen Systemen mit Digitaltechnologie umsetzt	Phonak 2005

angrenzenden Bereichen (Biomechanik, Biosensorik, Reizweiterleitung etc.) tätig sind.

Ein zunehmend wichtiger werdender Akteur ist die US-amerikanische Raumfahrtbehörde, die eine Reihe von Forschungsprogrammen im Bereich Bionik inklusive Prothetik unterhält (Bar-Cohen 2005).

2.2.2 Arm- und Beinprothesen

Die Entwicklung von Arm- und Beinprothesen kann in drei Entwicklungsabschnitte unterteilt werden: mechanische Prothesen, elektrische Prothesen und computergesteuerte Prothesen. Auf die Beschreibung von passiven, rein kosmetischen Prothesen wird verzichtet.

Die ersten mechanischen Prothesen entstanden mit Beteiligung von Uhrmachern an der Entwicklung, und es gelang die Fertigung von komplexeren Funktionen mit Federn und Zahnrädern.⁵¹ Für den Alltag gab es einfache Holzbeine und Handhaken. Elektrische Prothesen, auch myoelektrische Prothesen genannt, haben gegenüber mechanischen Prothesen den Vorteil, dass sie besser und fester greifen können sowie vielseitiger und einfacher zu benutzen sind. Die zentralen Komponenten elektrischer Prothesen sind kleine Elektromotoren, die die Finger-, Hand- und Ellenbogengelenke der Prothese bewegen.⁵² Die am weitesten entwickelte myoelektrische Prothese ist der so genannte bionische Arm. Der bionische Arm ist eine Prothese im Falle des vollständigen Armverlustes (Rehabilitation Institute of Chicago o.J.).

Computergesteuerte Prothesen unterscheiden sich von myoelektrischen Prothesen dadurch, dass eine komplexere Sensorik und ein Computerprozessor in die Prothese integriert sind. Die zusätzliche Sensorik dient der Überwachung der Bewegungsausführung. Die leistungsfähigste Prothese ist momentan das C-Leg,⁵³ wobei C für

⁵¹ Ein herausragendes Beispiel von prothetischer Handwerkskunst ist der Arm von Götz von Berlichingen (1480 bis 1562). Jedes Armgelenk konnte über die gesunde Hand einzeln bewegt werden. Durch Federn konnten die Gelenke arretiert und gelöst werden. Die Hand der Prothese konnte pronieren und supinieren und war an Lederbändern am Unterarm befestigt (Meier 2004).

⁵² Dabei nehmen kleine Oberflächenelektroden im Sockel der Prothese auf der Haut des Armstumpfes elektrische Spannungen auf, die bei Muskelkontraktion im Stumpf entstehen. Sie werden verstärkt und schalten die Elektromotoren für bestimmte Bewegungen an. Die neuesten Elektroden können verschiedene Signale unterscheiden und ermöglichen verschiedene Bewegungen. Voraussetzung für Benutzung ist allerdings, dass der Träger die Muskeln im verbliebenen Stumpf einzeln an- und entspannen kann (Dailami 2002).

⁵³ Das C-Leg besteht aus einem Carbonrahmen mit Hydraulik, Servomotoren, Elektronik und Akku sowie einem Unterschenkelrohr. Ein Sensor im Unterschenkelrohr misst kontinuierlich, in welcher Phase eines Schrittes sich der Prothesenträger befindet. Die Daten werden an einen Mikroprozessor weitergeleitet, der die entsprechenden Bewegungswiderstände für die Hydraulik berechnet. Ein weiterer Sensor misst die nötigen Daten für die Schwungphase des Beines, ein Kraftmesser misst die Fersen- und Vorfußlast. Neben der Komplexität der Prothese (Sensorik, Datenübertragung, Datenverarbeitung, Impuls an Hydraulik) hat sich mit dem C-Leg auch die Komplexität für den die Prothese anpassenden Prothetiker verändert. Der Prothesenträger benötigt neben der entsprechenden Schulung auch spezielle Geräte zur Anpassung und Justierung der Prothese (Jung 2004). Die Prothese wird über einen vasenförmigen, mit Gelkissen gepolsterten Silikonsockel mit dem Beinumpf verbunden (Jung 2004).

„computerised“ steht. Es ist die erste Prothese, deren Kniegelenksystem mit einer elektronisch geregelten hydraulischen Stand- und Schwungphasensicherung ausgestattet ist. Die Grenzen zwischen myoelektrischen und computergesteuerten Prothesen sind in den einzelnen Prothesen fließend. Während das C-Leg ohne myoelektrische Schnittstelle konstruiert ist, gibt es myoelektrische Handprothesen, die per Sensor die Stellung der Hand und des in der Hand gehaltenen Objektes kontrollieren, um bei Bedarf etwa automatisch den Druck der Hand zu erhöhen (IÖW/GL 2005, S. 79).

Trotz signifikanter Fortschritte bei künstlichen Körperextremitäten können die erhältlichen Prothesen heute keineswegs mit dem gesunden Arm oder Bein konkurrieren. Für die Zukunft der Prothetik werden neuronale Steuerung, biohybride Systeme und muskelähnliche Bewegungsauslöser (Aktuatoren) entscheidend sein.

Unter dem Oberbegriff Biomimetics wird eine Reihe von Forschungsaktivitäten unternommen, die erst im zweiten Schritt zur Entwicklung verbesserter Prothesen beitragen. Im ersten Schritt wird versucht, den Aufbau und den Ablauf menschlicher Bewegungen, des dafür notwendigen Designs und des Zusammenspiels von Knochen, Muskeln und Gelenken zu verstehen. Daher kann man davon ausgehen, dass Prothesen sich weiter den natürlichen Funktionen von Gliedmaßen annähern werden.

So gehen einige Entwickler beispielsweise davon aus, dass die Bewegungsfreiheit von Handprothesen verbessert werden würde, wenn das Handgelenk der Prothese in Aufbau und Funktionsweise dem menschlichen Original möglichst nahe ist. Dies erfordert ein umfassendes Verständnis der Anatomie sowie des Muskelzusammenspiels und deren Übersetzung in mathematische Modelle. Die bionische Komponente wird z. B. in der Nachahmung der Krümmung von Knochen (Elle und Speiche beim Arm) gesehen (Herr et al. 2003). Weiterhin wird versucht, eine bessere Überwachung der Stellung der Prothese im Raum zu erreichen⁵⁴ und diese Information an den Prothesenträger über Nerven rückzukoppeln (Stichwort Neuroprothetik). Dies würde die Anforderungen an die Signalübertragung signifikant erhöhen. Hier besteht noch Forschungsbedarf.

2.2.3 Hörprothesen

Hörgeräte und Implantate unterscheiden sich dadurch, dass bei ersteren der Schall verstärkt weitergegeben wird, während beim Implantat der Hörnerv direkt über eine Elektrode stimuliert wird (Shields/Gadre 2002).

Elektrische Hörgeräte

Bei elektrischen Hörgeräten wird der Schall von einem Mikrofon aufgenommen und über mehrere Schritte in

⁵⁴ Wird die Stellung der Prothese im Raum erfasst, muss die Position einzelner Prothesenteile in Beziehung zu einer Reihe von äußeren Parametern gesetzt werden (Krümmung des Fingergelenks am Zeigefinger in Bezug zu den einzelnen Gliedmaßen am Daumen, zur Handinnenfläche, zum gehaltenen Objekt, etc). Dadurch wird einerseits die zu verarbeitende Datenmenge größer, werden die Rechenaufgaben aufgrund der erhöhten Zahl an zu berücksichtigten Parametern komplexer und die Auswahl Reaktionsmöglichkeiten, über die automatisch entschieden werden muss, größer (IÖW/GL 2005).

ein elektrisches Signal umgewandelt. Dieses wird über einen Verstärker zu einem Empfänger weitergeleitet, erneut in ein akustisches Signal umgewandelt und verlässt dann das Hörgerät. Problematisch bei elektrischen Hörgeräten ist, dass der verstärkte Schall mit zunehmender Lautstärke an Hörqualität verliert, da Hintergrundgeräusche mit verstärkt werden. Die meisten Hörgeräte sind immer noch analog. Bei älteren Modellen wurden die eingehenden Geräusche einfach linear verstärkt. Inzwischen gibt es auch analoge Hörgeräte, die mit Hilfe eines Computers digital programmiert werden können (bessere Modulation der Verstärkung). Der fortgeschrittene Stand der Technik in diesem Bereich sind digitale Hörgeräte, bei denen der Schall in numerische Daten übertragen wird. In einem Chip wird der Schall so bearbeitet, dass er relativ originalgetreu weitergegeben werden kann. Elektrische Hörgeräte unterscheiden sich weiterhin durch den Ort, an dem sie getragen werden: hinter dem Ohr, in der Ohrmuschel, in einer Brille (Shields/Gadre 2002).

Cochlea-Implantate

In Deutschland leiden etwa 3 Mio. Menschen an einer Innenohrschwerhörigkeit, die mit herkömmlichen Hörgeräten nicht behoben werden kann. Meist liegt der Grund dafür in einer irreversiblen Schädigung der Haarsinneszellen im Hörorgan, der Cochlea oder auch Innenohrschnecke. Da die zum Zentralnervensystem führenden Nerven in diesen Fällen noch intakt sind, kann durch eine direkte Elektrostimulation der Nervenendungen die fehlende Sinnesübertragung ersetzt werden. Schallsignale werden durch ein Mikrophon aufgefangen, in ihre Frequenzanteile zerlegt, und dieses Signal wird durch Bündel von Elektroden frequenzspezifisch an die Nervenendungen übertragen (Luksch 2005).

Allerdings erreicht die Dichte der Elektroden bei weitem nicht die Dichte der Sinneszellen in der Cochlea. Das momentane Maximum besteht aus 22 Kanälen über 22 Elektroden. Damit kann das Cochlea-Implantat⁵⁵ wesentlich weniger Signale an den Hörnerv weiter geben, als eine intakte Cochlea, was zu einem hohen Informationsverlust und zu einer verzerrten Schallaufnahme führt. Für die meisten Träger erlaubt das Implantat nur die Erkennung von Geräuschen (ASHA 2004). Das Hören über das Implantat muss deswegen erlernt werden (mehrmonatige

⁵⁵ Ein Cochlea-Implantat besteht aus zwei integralen Bausteinen, von denen nur der interne Teil implantiert wird. Der interne Baustein ist ein Stimulator, der über einen Bleidraht mit einer Infracochlea-Elektrode verbunden ist und in den Schädel nahe der Cochlea implantiert wird. Der äußere Baustein besteht aus einem Mikrophon (am äußeren Ohr angebracht), einem Sprachprozessor (am Ohr oder am Körper angebracht) und einem Sender (hinter dem Ohr platziert). Über das Mikrophon empfangener Schall wird in elektrische Signale übersetzt, dann im externen Prozessor digitalisiert und zum Sender geschickt. Von dort gehen sie über Radiowellen zum Stimulator. Dort wird das Signal in ein elektrisches Signal gewandelt und zur Elektrode geschickt, die den Hörnerv anregt (Toh/Luxford 2002). Momentan gibt es Implantate von drei verschiedenen Anbietern, deren Modelle aber alle nach dem gleichen Prinzip arbeiten. Unterschiede bestehen in der Gestaltung der Elektroden und verschiedenen Mustern der Sprachcodierung (Zeng 2004).

Trainingsphase⁵⁶). Die Gründe für die Hörergebnisse bei den Betroffenen sind nicht genau bekannt. Die Erklärungsansätze reichen von den individuellen Eigenschaften der Patienten (Kurzzeitgedächtnis) bis zu der Häufigkeit der gehörten Wörter und ihrer akustischen Ähnlichkeit. Einigkeit besteht lediglich darüber, dass der Grund nicht in den unterschiedlichen Produkten der drei Anbieter liegt (Zeng 2004).

Der Erfolg der Cochlea-Implantate ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass im Innenohr eine vergleichsweise einfache Abbildung der akustischen Signale erfolgt, die Prothese also an diesem Übertragungsprinzip unmittelbar anknüpfen kann.⁵⁷ Forschungsbedarf besteht noch in der Grundlagenforschung (wie genau die neuronale Verarbeitung im Nukleus cochlearis erfolgt), um eine adäquate Stimulation zu generieren und dem Patienten einen „normalen Höreindruck“ zu vermitteln. Zudem konzentriert sich die aktuelle Forschung auf die Optimierung der technischen Vorverarbeitung des Signals (Luksch 2005).

Zukünftig sollen Cochlea-Implantate kleiner werden und verbesserte Funktionen zum Verstehen von Musik und Sprache, zur Schallquellenortung, zur Tonunterscheidung etc. erhalten. Auch hier setzen Wissenschaftler auf weitere Entwicklungen in Nanotechnologie und Bionik: „Micromachining, and nano- and biomimetic technology will produce innovative interfaces, electrodes, microphones, power sources, and packaging for totally biocompatible and totally implantable cochlear implants“ (Zeng 2004, S. 28).

2.2.4 Retina-Implantate

Während Cochlea-Implantate bereits häufig eingesetzt werden, sind Prothesen für einen Ausfall des Sehsystems noch nicht marktreif. Problematisch ist vor allem die noch weitgehend unverstandene Vorverarbeitung optischer Signale in der Netzhaut des Auges. Nicht nur die Anzahl der Sinneszellen ist mit über 120 Mio. sehr hoch, auch die Vorverarbeitung des Signals in der Retina bis zu den ins Gehirn projizierenden Ganglienzellen ist hochkomplex. Neben den Ansätzen, das optische Signal auf der Ebene der Retina in das visuelle System einzukoppeln, gibt es auch Bestrebungen, die optischen Nerven oder die visuellen Zentren der Großhirnrinde direkt zu stimulieren. Während die Einkopplung in den optischen Nerven vor allem mit technischen Problemen verbunden ist, ist die Stimulation des visuellen Cortex – aufgrund von Wissenslücken um dessen Verarbeitungsprinzipien – problematisch. Hier besteht noch enormer Forschungsbedarf (Luksch 2005).

⁵⁶ Der Erfolg bei der Wiedererlangung des Hörvermögens nach einer erfolgten Implantation variiert stark von Patient zu Patient. Die Bandbreite reicht von Patienten, die lediglich eine sehr geringe Verbesserung erfahren, bis zu Patienten, die in einer ruhigen Umgebung so gut hören wie vor Beeinträchtigung der Hörfähigkeit (IÖW/GL 2005).

⁵⁷ Sobald pathologische Veränderungen am Hörnerv vorliegen, wird die Anbindung komplizierter, da das Signal dann direkt auf das erste zentralnervöse Zentrum übertragen werden muss.

Schematisch sind die Retina-Implantate den Cochlea-Implantaten ähnlich. Statt Schall wird Licht aufgenommen, von einem Mikroprozessor verarbeitet, und über eine Elektrode wird der Sehnerv angeregt. Es gibt zwei Arten von Retina-Implantaten, die sich zwar vom Prinzip her ähneln, in der Lage der Elektrode leicht, in der technischen Umsetzung aber stark unterscheiden. Bei epiretinalen Prothesen⁵⁸ wird die Elektrode auf der Netzhaut, bei subretinalen Prothesen⁵⁹ hinter der Netzhaut positioniert (IÖW/GL 2005, S. 82).

Momentan wird das Implantat im Tierversuch entwickelt, wobei sich seine prinzipielle Funktionsfähigkeit gezeigt hat. Beim Menschen wird das subretinale Implantat momentan nicht getestet. Dies liegt unter anderem daran, dass der operative Eingriff wesentlich aufwendiger und tiefer ist als beim epiretinalen Verfahren (Gekeler/Zrenner 2005). Voraussetzung für die Entwicklung von Retina-Implantaten waren Fortschritte in der Medizin, den neuronalen Interfaces und der Mikrosystemtechnik. Durch sie wurden die Miniaturisierung der elektronischen Hardware, die Entwicklung neuronaler Schnittstellen und die Verankerung der Implantate möglich.

Retina-Implantate werden direkt mit Bionik in Zusammenhang gebracht, allerdings in einer facettenreichen Diskussion: Neben simplen Gleichstellungen „Retina-Implantat=bionisch“ gibt es auch Einschätzungen, dass Retina-Implantate erst bionisch werden, wenn zum Beispiel die verwendeten Mikroprozessoren nach Vorbild von neuronalen Netzwerken lernfähig werden (European Commission/US National Science Foundation 2001, S. 26). Hinsichtlich der Zuschreibung zur Bionik ist das Retinaimplantat ein Beispiel dafür, wie die mit der Bionik konnotierte „Naturnähe“ und „Sanftheit“ miteinander in Konflikt geraten können. Auf den ersten Blick scheint das subretinale Implantat „naturnäher“ zu sein, weil es mit

⁵⁸ Ein epiretinales Implantat stimuliert die Ganglienzellen des Sehnervs durch Elektroden, wenn es durch die Degeneration der dazu eigentlich dienenden Neuronen in der Netzhaut zur Erblindung gekommen ist. Epiretinale Prothesen ähneln im technischen Aufbau den Cochlea-Implantaten. Eine Kamera, die beim Prothesenträger etwa in einer Brille integriert sein könnte, fängt die Bilder der Außenwelt ein und leitet sie an einen Sehprozessor weiter. Der Sehprozessor wird extern am Körper getragen. Der Prozessor wandelt die Kamerasignale mit Hilfe von retinaspezifischen Algorithmen in einen Datensatz, der die in der Retina implantierte Elektrode steuert. Über einen, ebenfalls extern am Körper getragenen, Sender geht der Datensatz dann an einen Empfänger, der in einer künstlichen Linse angebracht ist. Der Empfänger ist schließlich über ein Mikrokabel mit der Elektrode verbunden, an die er die Daten weiterleitet. In die Elektrode integriert ist ein Simulatorchip, der die empfangenen Daten decodiert und daraus Dauer sowie Stärke der Reizströme der Elektrode bestimmt (Walter/Mokwa 2005).

⁵⁹ Beim subretinalen Implantat sollen degenerierte Photorezeptoren ersetzt werden. Das Implantat besteht aus einem Mikrodiodenphotoarray (MPDA) und Mikroelektroden. Das MPDA ersetzt die Photorezeptoren und misst die Helligkeit des auf die Netzhaut projizierten Bildes an bis zu 1 500 Orten. Gleichzeitig wandelt es das Licht in Strom um. Die Mikroelektroden geben den Strom an die über dem Implantat liegende Netzhaut ab. Zur Weiterleitung des Bildes müssen allerdings der optische Apparat des Auges zur Projektion eines Bildes auf die Netzhaut und die restlichen Netzhautschichten aktiv genug sein, um die vom Implantat generierten Signale über den Sehnerv ans Gehirn zu leiten.

wesentlich weniger Technik auskommt als das epiretinale Implantat. Bei genauerer Betrachtung der zur Implantation notwendigen chirurgischen Verfahren könnte sich aber herausstellen, dass der Eingriff zum Einsetzen eines Implantats unter der Netzhaut wesentlich schwieriger und riskanter ist als der eines Implantats auf der Netzhaut (IÖW/GL 2005).

2.3 Trends, Chancen und Risiken

Eine zusammenfassende Beschreibung von technologischen Trends, die das gesamte heterogene Feld der Prothetik betreffen, kann an dieser Stelle nicht erfolgen, sondern bedürfte einer eigenen Untersuchung. Bei der Betrachtung von Chancen und Risiken spielen nicht nur die forschungsseitigen Möglichkeiten eine Rolle, sondern auch die öffentliche Wahrnehmung des Themas und die Sichtweise von betroffenen Personen.

Akzeptanzfragen

Beim Einsatz und Tragen von Prothesen treten medizinische Risiken (Überbelastung der gesunden Körperteile, Entzündungen im Stumpf, Risiken beim operativen Eingriff, offene Frage nach der langfristigen Biokompatibilität der Implantate im Körper etc.) als auch Akzeptanzfragen auf.

Am Beispiel des Cochlea Implantats zeigt sich zusätzlich ein soziales Risiko bei der Einführung von Prothesen oder Medizintechnik allgemein. Gehörlose hatten in den Niederlanden die Implantation von Cochlea-Implantaten öffentlich abgelehnt. Sie begründeten dies mit der durch die Anwendung der Technologie einhergehende Positionierung der Welt der Gehörlosen als „behindert“ durch die Welt der Hörenden. Das Beispiel illustriert, wie die Weltansichten der Technologieentwickler und einiger potenzieller Technologienutzer sich unterscheiden können. Waren die Entwickler der Implantate davon ausgegangen, dass die Implantate zum Vorteil von allen Gehörlosen sind (angeboren und später erworben), so wurde diese Ansicht nicht von allen Gehörlosen geteilt (Blume 2000; IÖW/GL 2005; Reuzel 2001).

Insgesamt gesehen ist – ähnlich wie Nanotechnologie bei Implantaten – auch Bionik im prothetischen Bereich eine eher „virtuelle Diskussion“ für die Anwenderseite. Der scheinbaren Etablierung auf der Forschungsebene entspricht keine wirkliche Etablierung in der Praxis (Ausnahme: Oberflächenbeschichtungen bei Implantaten). Ein grundlegendes Akzeptanzproblem bei Implantaten ist, dass bei Vitalimplantaten (z. B. Herzschrittmacher) im Allgemeinen bei Betroffenen eine offene, positive Einstellung herrscht. Komplexere Implantate stoßen dagegen eher auf Ablehnung (z. B. mit Argumenten wie „macht das Leben kompliziert“).

Erwartungen an die Nanotechnologie liegen eher bei der Fertigungstechnik (Herstellung von Nano- bzw. Mikroelektroden); Erwartungen an die Bionik bestehen in der Prothetik am ehesten in Sachen Formoptimierung, um Material einzusparen (Stieglitz 2005). Seitens der Hersteller sind damit Hoffnungen auf eine verbesserte Kun-

denakzeptanz durch einen verbesserten Tragekomfort bei zunehmender Komplexität von Prothesen/Implantaten verbunden.

Prinzip der neuronalen Steuerung

Das Prinzip der neuronalen Steuerung kann als eine zukünftige Entwicklungslinie identifiziert werden, wobei sich die meisten diesbezüglichen Aktivitäten noch im Bereich der Grundlagenforschung oder in Frühphasen der Anwendung befinden. Ein Ansatzpunkt ist z. B. die Elektrostimulation von Zentren im Zentralnervensystem (ZNS). Das ZNS von Wirbeltieren ist so komplex, dass eine direkte elektrische Stimulation zentralnervöser Zentren mit vielen Schwierigkeiten verbunden ist. Deutlich problemloser sind Stimulationen peripherer Nerven, die bei verschiedensten pathologischen Veränderungen eingesetzt werden (z. B. Spinalnervenstimulation zur Blasen- und Schließmuskulaturkontrolle bei Querschnittslähmung). Es gibt allerdings einige erfolgreiche Anwendungen der direkten Elektrostimulation im Zentralnervensystem (z. B. zur Linderung motorischer Blockaden bei Parkinson-Patienten). Des Weiteren gibt es für die direkte Ansteuerung von Prothesen, also die Behandlung von querschnittsgelähmten Patienten, eine Vielzahl von Ansätzen, die darauf abzielen, entweder die noch vorhandene Muskulatur zu stimulieren oder Prothesen zu bewegen. Problematisch bleibt – als Ansatzpunkt für die Bionik – die biologische Informationsverarbeitung⁶⁰ und daraus abgeleitete Algorithmen für die Technik (Luksch 2005).

Hybridtechnologie

Unter dem Begriff Hybridtechnologie versteht man die direkte Kopplung von biologischen informationsverarbeitenden Elementen (Neuronen) mit technisch hergestellten Elementen (Halbleiterbauteile). Im technischen Bereich ist inzwischen relativ viel Grundlagenforschung geleistet worden, so dass es heute möglich ist, verschiedenste Nervenzellen auf Siliziumchips wachsen und eine Interaktion zwischen den Komponenten stattfinden zu lassen (Luksch 2005).

Mit der Forschungsrichtung „biohybride Körperteile“ hoffen Wissenschaftler, aus gezüchtetem Gewebe, verlängerten Knochenstümpfen, Titanprothesen und einer neuen Generation von implantierten Sensoren Prothesen zu schaffen, die über Gehirnsignale gesteuert werden können (Versweyveld 2004). Beispielsweise entwickelt die Firma Cyberkinetics momentan einen Chip unter dem Namen Braingate, der es seinen Trägern ermöglicht, durch Gedanken Dinge in Bewegung zu setzen. Das Chipsystem

besteht aus einem Sensor, der in den „Motor Cortex“ des Gehirns implantiert wird und einem Apparat, der die Gehirnsignale interpretiert. Der Chip ist für Querschnittsgelähmte konzipiert und befindet sich in der klinischen Testphase. Zukünftig sollen mit dem Chip unter anderem Rollstühle gesteuert und Exoprothesen bewegt werden.⁶¹

Nach Ansicht von Experten sind die praktischen und theoretischen Schwierigkeiten der Hybridtechnologie noch so gravierend, dass ein ernsthaftes Nachdenken über „Chips im Gehirn“ oder „Gehirne im Computer“ derzeit nicht angebracht ist (Luksch 2005).

Ethische Aspekte

Wie bei allen Technologien sehen Experten auch bei der Prothetik das größte Risiko in einer ungenügenden Sensibilisierung und Diskussion der Wechselwirkungen zwischen Mensch, Technik und Gesellschaft bei einer Weiterentwicklung und Weiterverbreitung von implantierbaren Mikrochips (Rodotà/Capurro 2005). Davon sind Prothesenträger insbesondere betroffen, da in allen der drei vorgestellten Bereiche der verstärkte Einsatz von implantierten Mikrochips geplant ist. Die Europäische Gruppe für Ethik in den Naturwissenschaften und Neuen Technologien bei der Europäischen Kommission nennt folgende Punkte, die verstärkter Reflexion und Diskussion bedürfen (IÖW/GL 2005):

- Verletzung der Menschenwürde,
- Instrumentalisierung des Menschen,
- Wahrung der Privatsphäre,
- Diskriminierung bei der Bereitstellung von medizinischen Leistungen,
- Wahrung des Vorsichtsprinzips,
- Wertekonflikte in der Technologieentwicklung.

Die Gruppe weist ebenfalls darauf hin, dass in einer ganzen Reihe von Bereichen noch erhebliche Wissenslücken bestehen, deren Schließung zur Beurteilung von weitergehenden Risiken notwendig ist. Es ist beispielsweise nicht klar, unter welchen Umständen Gehirnimplantate die Autonomie des Menschen antasten. Offen ist auch die Frage, ob Implantate irreversible Folgen für Körper und/oder die Psyche des Menschen haben. Im Mittelpunkt stehen dabei Fragen nach der Würde des Menschen, speziellen Implikationen für den Schutz der Privatsphäre und Überwachung, Konsequenzen für das menschliche Selbstverständnis bei der Verbesserung menschlicher Fähigkeiten,⁶² sozialen Aspekten und der Vorhersehbarkeit der Risiken (Rodotà/Capurro 2005).

⁶⁰ Ein wichtiger Unterschied zwischen technischer und biologischer Informationsverarbeitung ist die jeweilige Zielsetzung: In der Technik ist das Ziel, vorhandene Informationen auszuwerten und nach vorgegebenen Algorithmen zu verarbeiten. Wichtig ist dabei die korrekte Zuordnung zwischen Input und Output (z. B. Taschenrechner, Kreditkarten-Lesegerät). Das primäre Ziel von biologischen informationsverarbeitenden Systemen ist dagegen das Überleben seines Trägers. Biologische Systeme stehen daher meist vor dem Problem, entweder präzise oder schnell zu sein (Luksch 2005, S. 88).

⁶¹ Für eine ausführliche Beschreibung siehe <http://www.cyberkinetic-sinc.com>.

⁶² Der Begriff „Verbesserung menschlicher Fähigkeiten“ von (Rodotà/Capurro 2005) ist nicht weiter definiert. Er muss also sehr allgemein als die Verbesserung der menschlichen Fähigkeiten über seine genetischen Veranlagungen hinaus verstanden werden (IÖW/GL 2005, S. 85)..

Der Einsatz von Prothesen und Implantaten ist zunächst auf eine Verbesserung der Lebensqualität Betroffener ausgelegt. Daneben sind mit diesen aber auch Leistungssteigerungen beim Menschen („Enhancement“) möglich. Ansätze, die u. a. auch im Zusammenhang mit der Nanobiotechnologie verfolgt werden, zielen z. T. darauf ab, „natürliche Prozesse“ zu verbessern, nicht zuletzt deshalb, weil die Natur „keineswegs das Optimum erreicht habe“ (IÖW/GL 2005, S. 103). Es geht damit nicht allein nur um die Frage des „enhancements“ des Menschen, sondern ebenso um das natürlicher Prozesse. Damit steht auch das häufig verwendete Argument, die Natur habe 5 Mrd. Jahre Erfahrung, aus Risikosicht in gewisser Weise in Frage.

Mit Bezug zu der eingangs erwähnten Einordnungsproblematik der Nachbildung lebender Systeme, insbesondere von Prothesen und Implantaten, zur Bionik, lässt sich festhalten, dass sich die Fachwelt hier nicht einig ist. Interessant bleibt – unter bionischen als auch ethischen Aspekten – der Bereich biologisch-technischer Interaktion bzw. Schnittstellen (s. a. Kap. II), also der funktionalen Verknüpfung biologischer und technischer Strukturen.

3. Natural Computing

Die Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) zeichnen sich seit Jahrzehnten durch eine außerordentlich hohe Dynamik aus. Kein anderes Gebiet hat die moderne Gesellschaft so stark verändert (Castells 2001). Lebens- und Arbeitswelt, Konsum- und Produktionsmuster, Wertschöpfungsketten, politische Kommunikation (Grunwald et al. 2005) – kaum ein Bereich ist von den IuK nicht massiv beeinflusst worden. Informationsspeicherung und -verarbeitung im Computer, mobile Kommunikation und das Internet sind dabei die wesentlichen technischen Entwicklungen. Angesichts technischer Probleme weiterer Miniaturisierung und der Komplexitätssteigerung in der Softwareproduktion werden zunehmend bionische (evolutionäre) Techniken erprobt. Zentraler Bereich ist das „Natural Computing“. Dieser Abschnitt be ruht vor allem auf dem Gutachten von IÖW/GL (2005).

3.1 Aktuelle Herausforderungen

Leistung und Kapazität der IuK konnten in den letzten Jahrzehnten stark gesteigert werden, sowohl in Bezug auf die Hardware, etwa durch höhere Taktfrequenzen, schnellere Zugriffszeiten und größere Speicher, als auch durch die zunehmende Parallelisierung, Verteilung und Verknüpfung von Systemen. Die ortsungebundene Nutzung elektronischer Medien wurde vor allem durch die Miniaturisierung und die Entwicklung drahtloser Übertragungstechnologien, wie Mobilfunk oder Wireless LAN ermöglicht. Neben den Veränderungen im geschäftlichen und privaten Bereich, wie mobile Kommunikation oder „mobiles Büro“, ermöglicht dies auch die Kommunikation von räumlich verteilten elektronischen Geräten untereinander (Ubiquitous Computing, vgl. Pfaff/Skiera 2002). Die Miniaturisierung elektronischer Bauteile, insbesondere bei der Prozessortechnik, im Bereich eingebet-

teter Systeme und mobiler Endgeräte ist dabei ein wesentlicher technischer Antreiber der Entwicklungen.

Es zeichnen sich jedoch technische Herausforderungen ab, deren Lösung noch nicht klar erkennbar ist. Das gilt zum einen für die fortschreitende Miniaturisierung, da bei der weiteren Verkleinerung wichtige Materialeigenschaften (z. B. in der Herstellung von Chips) zunehmend an ihre Grenzen gelangen (BSI 2003). Mikrosystemtechnik und Nanoelektronik arbeiten zwar an weiteren Miniaturisierungsschritten (TAB 2003, Kap. VI); die Forschung hierzu ist jedoch noch teils weit von der industriellen Nutzbarkeit entfernt.

Zum anderen deuten sich weitgehende Entwicklungshürden im Softwaredesign an, die dazu führen, dass Softwareprodukte und -entwicklungen mit der Entwicklung der Hardware (Prozessorkapazität) nicht mithalten können. Traditionelle Methoden im Softwaredesign beinhalteten eine gründliche Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Problem und eine genaue Planung der Lösungsstrategie (top-down). Das bedeutet, dass grundsätzlich – und damit auch bei sehr komplexen Anforderungen – die möglichen Zustände eines Programms und die sich daraus ergebenden Situationen vollständig bekannt und getestet worden sein sollten. Ab einem bestimmten Komplexitätsgrad des Systems stößt dieser Ansatz jedoch an Grenzen. So steht z. B. häufig in der Praxis nicht hinreichend Zeit zur Verfügung, um ein vollständiges Testprogramm durchzuführen. Ein Teil der Testphase wird dann letztlich dem Nutzer aufgebürdet.

Die Abhängigkeit der modernen Gesellschaft vom Funktionieren der IuK (z. B. in der Abwicklung von Finanztransaktionen) führt zu erhöhten Anforderungen an die Betriebssicherheit von Hard- und Software. Diesen erhöhten Anforderungen steht jedoch die ebenso wachsende Komplexität entgegen, welche sich – unter den oben geschilderten Bedingungen – immer schlechter nach einem Top-down-Ansatz realisieren lässt. Fehleridentifikation und -behebung gestalten sich mit der steigenden Komplexität der Systeme immer schwieriger.

Deswegen sollte nach Meinung vieler IuK-Designer (Christensen/Bickhard 2002; Kephart 2003) die Top-down-Herangehensweise, die eine vollständige Kontrolle anstrebt, zu Gunsten natürlicher Ordnungsprinzipien (bottom-up) aufgegeben werden. Entsprechende bionisch inspirierte Lösungsansätze setzen auf Selbstorganisation, Selbstreparatur und evolutionäre Optimierung. Da ein vollständig fehlerfreies System nur schwer (wenn überhaupt) geschaffen werden kann, sollte Fehlertoleranz in das System integriert werden, d.h. die Fähigkeit, Fehler zu erkennen und autonom zu beheben (Sörensen 2004). Diese Entwicklung wird auch dadurch angetrieben, dass die Softwarewartung und die Behebung von Fehlern während der Nutzungsphase einen immer größeren Anteil an den Gesamtkosten einnehmen. Mittlerweile entfallen von den Gesamtkosten eines Softwaresystems ca. 40 Prozent auf die Wartung (Glass 2004).

Natürliche Prozesse und Systeme verfügen über Eigenschaften, die einigen IuK-Forschern als nachahmenswert

in der Entwicklung von Hardware und Software erscheinen (Brownlee 2005). Die wichtigsten von ihnen sind

- Adaptivität
- Autonomie
- Reversibilität
- Lernfähigkeit
- Fehlertoleranz
- Selbstorganisation
- hohe Redundanz und
- Robustheit.

Andere Eigenschaften werfen jedoch Probleme auf. So verlaufen natürliche Prozesse im Allgemeinen nicht geplant und deterministisch, sondern unpräzise und stochastisch. Die entstehenden Lösungen sind zwar hoch optimiert, aber dafür auch sehr spezialisiert. Auch ist zu berücksichtigen, dass evolutionäre Prozesse sehr zeitintensiv sind. Aus diesen Gründen können evolutionäre Techniken nicht unmittelbar für Problemlösungen in der IuK-Branche herangezogen werden, sondern die Nutzung entsprechender Potenziale bedarf teils erheblicher Anstrengungen in Forschung und Entwicklung.

3.2 Variationen des „Natural Computing“

Unter den Begriff „Natural Computing“ fallen alle Ideen, Modelle und Methoden aus dem Bereich der IuK, die dem bionischen Gedankengang der Übertragung bestimmter Erkenntnisse aus der Natur in die IuK entsprechen (Paun 2004). Parallel werden dafür auch Begriffe wie „bio-inspired computation“, „biocomputation“ und „bio-mimicry“ verwendet (Brownlee 2005). Hauptziel ist das Lösen von konkreten Problemen durch Beobachten von natürlichen Prozessen sowie die Übertragung von gewonnenen Erkenntnissen für die Entwicklung von Rechensystemen und Algorithmen, die das Problem lösen können (de Casto 2005). Unterteilt werden kann das Natural Computing in die Suche nach neuen Typen von Algorithmen (evolutionäre, neurale und genetische Algorithmen) und die Suche nach neuer Hardware (DNA-Moleküle als Basisbausteine).

Der Begriff „evolutionary computing“ bezeichnet die Suche nach und die Verwendung von Algorithmen, die in einem gegebenen Lösungsraum unter gegebenen Such- und Abbruchkriterien nach einer optimalen Lösung mit Hilfe von Evolutionsmechanismen suchen (Rechenberg 1994; Schwefel 1995; vgl. a. <http://www.bionik.tu-berlin.de>). Die möglichen Lösungen im Lösungsraum werden durch Mutation und Variation verändert, und es wird jeweils überprüft, ob sie dabei den gewünschten Anforderungen näher kommen. Sogar die „Fortpflanzung“ in die nächste Generation kann durch der sexuellen Fortpflanzung analoge Regeln simuliert werden (Nachtigall 2002, S. 366). Die auf diese Weise positiv evaluierten Elemente werden in die nächste Generation übernommen und wieder verändert. Das geschieht solange, bis der Lösungsraum nur aus Elementen mit gesuchten Eigenschaften besteht. Diese

Suchalgorithmen werden als Evolutionäre Algorithmen (EA) bezeichnet.

Zum „evolutionary computing“ gehören weitere Techniken wie „evolutionary programming“, „evolutionary strategies“ und das „genetic programming“. Dabei handelt es sich um Verfahren (Algorithmen oder Programme), die durch Rekombination, Mutation und Selektion nach einer optimalen Problemlösung in einer zufälligen Population von anderen Lösungen suchen. Letztlich geht es immer darum, mittels einer kybernetischen Rückkopplungsschleife (Stachowiak 1970) und des ständigen Soll-/Ist-vergleichs Lernprozesse auszunutzen. Dieses Vorgehen ist selbstverständlich nur sinnvoll, wenn durch eine hohe Rechnerkapazität in kurzer Zeit eine extrem hohe Zahl an Kombinationen „durchgerechnet“ werden kann. Dies erfolgt in Anlehnung an Prinzipien der Evolutionstheorie allerdings nicht rein zufallsgesteuert, sondern so, dass Mutation und Selektion durch inkrementelles Ausprobieren und Beobachtung der resultierenden Effekte „nachgebaut“ werden können. Auf diese Weise ist es z. B. gelungen, den Wirkungsgrad einer Überschalldüse eines Raketentriebwerks von 55 Prozent auf 80 Prozent zu steigern (nach WWF 1995).

Evolutionäre Techniken können zu Routen- und Zeitplanung, Simulation und Kontrolle komplexer Systeme und Klassifizierung eingesetzt werden. Entsprechende Verfahren werden bereits in der Industrie und Technik zu Flugverkehrsregulierung, Berechnung von Telefonnetzen und Lösung von nicht linearen Differentialgleichungen verwendet.

Im „neural computing“ wird versucht das Nervensystem, insbesondere Gehirnprozesse auf der Basis neuronaler Modelle nachzubilden. Es entstehen künstliche neuronale Netze, die die Struktur des Nervensystems und die Informationsverbreitung darin mit Rechenelementen nachbauen (Nachtigall 2002, S. 262 ff.). Die Neuronen werden durch Computerprozessoren dargestellt, die untereinander vernetzt sind. Die Eigenschaften natürlicher neuronaler Systeme, wie Lernfähigkeit und die Fähigkeit, aus gegebenen Eingabemustern die Ausgabe zu bestimmen, werden hier für technische Informationsverarbeitung benutzt. Die künstlichen neuronalen Netze werden dort eingesetzt, wo eine Mustererkennung, also beispielsweise Regelungstechnik, Text- und Bilderkennung, benötigt wird, oder auch, um eine Prognose über ein Systemverhalten zu erstellen, die das Netz aus gegebenen Sollwerten und der „beobachteten“ Entwicklung ermittelt. Weitere Einsatzgebiete sind Funktionsapproximation und Klassifikation von Daten.

Das „DNA Computing“ führt eine neue Form der Hardware ein. Hier werden DNA-Moleküle als Rechnerbausteine benutzt. Mit Hilfe biochemischer Reaktionen wird die Basenpaarkombination des Moleküls entsprechend der Eingabeparameter des Problems kodiert. In dieser Lösung finden dann Reaktionen unter den Molekülen statt, so dass schon in einer kurzen Zeit sich die Moleküle zu einer „Aufgabenlösung“ finden. Die Stränge, die nicht zu den Ein- und/oder Ausgabeparameter der Aufgabe passen, werden durch weitere chemische Reaktionen so

lange heraus gelöst, bis nur die „richtigen“ Moleküle in der Lösung bleiben. Dieses noch junge und sehr aufwendige Verfahren nutzt die Codierungsweise der DNA, die Parallelität der biochemischen Prozesse und die Energie- und Ressourceneffizienz zur Lösung komplexer Probleme. Allerdings gibt es bislang nur wenige Experimente mit dem „DNA-Computer“. Dabei benötigt die Lösung von anderweitig bereits gelösten kombinatorischen Problemen noch unverhältnismäßig mehr Zeit, verglichen mit dem konventionellen Weg.

Unter Hybridlösungen werden Technologien verstanden, die neben den herkömmlichen Silikonkomponenten auch Komponenten aus natürlichen Stoffen wie DNA-Molekülen, bestehen. Beispiele dafür sind die so genannten Biochips. Das sind Probenträger aus Glas oder Kunststoff, auf welchen biochemische Prozesse für Tests und Nachweise stattfinden. Ihr Anwendungsgebiet liegt in der Medizintechnik und Pharmazie. Das bekannteste Beispiel für eine Hybridlösung ist das Experiment, bei dem 25 000 Nervenzellen aus einem Rattengehirn so mit einem Computer verbunden wurden, dass das dadurch konfigurierte neuronale Netz einen Flugsimulator selbständig fliegen konnte (IÖW/GL 2005).

3.3 Risiken

Mit der Verwendung evolutionärer bionischer Ideen in der IuK im Rahmen des „Natural Computing“ sind auch Risiken und Ungewissheiten verbunden:

- Evolutionäre Ansätze in der IuK versprechen vor allem höhere Rechengeschwindigkeiten, höhere Speicherkapazität, Fähigkeit zur Selbstreparatur und mehr Fehlertoleranz. Jedoch ist ein Charakteristikum der Evolution auch die unvorhersehbar lange Zeitspanne, die die Suche nach Lösungen erfordern kann. Dass die Natur „Millionen Jahre Entwicklungsvorsprung“ hat (Nachtigall 2002), erweist sich in neu auftretenden Anforderungen als Nachteil. Lösungen heute werden in der Regel innerhalb kurzer Zeiträume benötigt.
- Die Lösung, die mit Hilfe evolutionärer Algorithmen gefunden wurde, ist für das eine Beispiel evolutionär optimiert, in dem sie untersucht wurde. Die Übertragbarkeit auf andere Felder, Randbedingungen und Situationen ist zunächst nicht anzunehmen. Schwerwiegender noch, es fehlt an einem Evaluierungsmechanismus, mit dem diese Übertragbarkeit eingeschätzt werden könnte, da aufgrund der Bottom-up-Eigenschaft der Optimierung nicht Schritt für Schritt nachvollziehbar ist, warum es gerade zu dem jeweiligen Ergebnis gekommen ist.
- Einige im Laufe der evolutionären Optimierung gefundenen Zwischenlösungen könnten „vorzeitig“ verworfen werden, wenn sie nicht dem aktuellen Verständnis von optimalen Eigenschaften in der betreffenden Situation genügen. Allerdings könnte es sich um Lösungen handeln, die in einem ähnlichen Feld besonders kreativ und effizient wären. Die evolutionäre Optimierung enthält also das Risiko verpasster Chancen.

- Biologische Prozesse haben einen großen Grad an Komplexität und sind im hohen Maße nicht deterministisch und unscharf, was mit den Zielen der Informationstheorie schlecht vereinbar ist (Paun 2004). Diese Aussagen fasst das Trade-off-Prinzip zusammen: Programmierbarkeit, Effizienz und Evaluierbarkeit sind sich widersprechende Eigenschaften eines Computermodells. Oder anders ausgedrückt: „programmability and adaptability are incompatible. The price for combining both is inefficiency“ (Conrad 1988).
- Ein weiterer Punkt ist, dass bei einer evolutionären Vorgehensweise die schöpferische Kreativität des Menschen beim Lösungsprozess nicht berücksichtigt wird. Die Möglichkeit, dass eine schnellere und effizientere Lösung durch den Menschen mit Hilfe seiner Hintergrundinformationen gefunden wird, besteht dann nicht mehr. Außerdem gehen wertvolle Informationen über den Lösungsweg verloren, denn der Benutzer bekommt nur eine fertige Lösung und nicht den Lösungsalgorithmus zu sehen. Die Abhängigkeit des Menschen von der „maschinellen“ Lösung – die dann für den Menschen eine „black box“ darstellt – wächst beträchtlich.

Insgesamt würde das Risiko des Kontrollverlusts wachsen: Programme, die neue Programme oder Innovationen erschaffen, ohne dass der Mensch sich im Prozess beteiligt und von dem bearbeitenden Gebiet womöglich keine Ahnung hat. Wie weit soll die Autonomie der eigenständigen Systeme gehen? Die wachsende Reaktionsfähigkeit der Roboter und Automaten und ihre Interaktion mit der Umwelt macht sie immer „natürlicher“ und selbständiger. Diese Entwicklungen sind einerseits dabei unsere heutigen Probleme zu lösen, doch die Auswirkungen der weiteren Entwicklung in diese Richtung können zu einem neuen Gesellschaftsbild und zu Veränderungen im Verständnis und Umgang mit Technik führen, die Auswirkungen über die Produktionsprozesse hinaus haben werden.

4. Organisationsbionik

Natürliche Systeme zeigen vielfach ein Verhalten, das als „selbst organisiert“ bezeichnet wird. Dabei geht es um die Herausbildung von Mustern in Raum und Zeit auf der Basis des Verhaltens vieler Elemente eines größeren Systems. Beispiele hierfür sind (nach Nachtigall 2002, S. 391) das synchronisierte Blitzen von Glühwürmchen, die Weise, wie Muster auf Schneckenschalen und Korallen entstehen, wie sich Fische oder Vögel zu Schwärmen ordnen (Schwarmintelligenz),⁶³ wie Bienen einen funktionierenden Staat bilden, wie sich Ameisen in einer fremden Umgebung orientieren oder wie Termiten kollektiv ihre Nester bauen. Auf der zellulären und subzellulären Ebene ist ebenfalls eine Vielzahl selbst organisierter Prozesse als grundlegende Lebensprozesse zu nennen, welche im Blickfeld der Nanobiotechnologie liegen (Kap. V.1).

⁶³ So können z. B. Fischschwärme in Sekundenbruchteilen ihre Bewegungsrichtung ändern, ohne dass ein Fisch einen anderen berührt. Eine Anwendungsoption könnte in der Steuerung großer Menschenmengen in Panik bestehen.

Technische Einrichtungen und Prozesse sind demgegenüber in der Regel gerade nicht in einer selbst organisierten Weise entstanden oder funktionieren so, sondern sie sind hierarchisch geplant und entsprechend implementiert. Ausgehend von Lastenheften, Entwurfsideen und Konstruktionsüberlegungen wird ein Design bzw. ein Bauplan für eine technische Problemlösung erstellt, welcher dann nach ingenieurwissenschaftlichen Standards realisiert wird. Die so genannte Organisationsbionik befasst sich mit Managementkonzepten und technischen Prozessen auf der Basis von Prinzipien der Selbstorganisation in Entgegensetzung zu hierarchischen Strukturen.

Charakteristisch für Selbstorganisationsprozesse ist, dass Informationen von lokalen Elementen ausgehen und dass durch Informationsverbreitung – sozusagen von Nachbar zu Nachbar, etwa in einem Vogelschwarm – sich allmählich ein dominantes Muster herausbildet. In den Prozessen der Informationsverbreitung müssen positive Rückkopplungseffekte enthalten sein, die für die notwendigen Resonanzen und die Ausbreitung der Information sorgen. Weiterhin muss es Grenzen der positiven Rückkopplung geben, damit das System nicht außer Kontrolle gerät oder zerstört wird, und es müssen negative Rückkopplungseffekte zur Dämpfung der Effekte vorhanden sein, damit überhaupt ein stabiles System entstehen kann (Glansdorff/Prigogine 1971, nach Nachtigall 2002, S. 392). Auf diese Weise können „komplexe Handlungen oder Bauwerke entstehen (...), ohne dass jeder Beteiligte einen vollständigen ›Bauplan‹ kennen muss“ (Nachtigall 2002, S. 392).

Die Hoffnung ist, dass sich durch die Nutzung des Prinzips der Selbstorganisation in Fragen von Management und Organisation komplexer Prozesse überraschende und „bessere“ Lösungen ergeben können als durch das klassische technische Design. Grundlegende Voraussetzung ist, dass gesellschaftliche Teilbereiche (z. B. sozioökonomische Bereiche) in bestimmten Hinsichten analog zu biologischen Systemen modelliert werden können. Diese Analogie betrifft die für Selbstorganisation wichtigen Eigenschaften der zufälligen Variation, der Selektion „erfolgreichen Verhaltens“, der Anwendbarkeit des Populationsprinzips (nach dem eine vielfältige Population aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften und Robustheiten der Individuen besser auf veränderliche Randbedingungen reagieren kann als eine „geklonte“ Menge identischer Individuen) sowie der Modularität und Hierarchisierung (analog zur Hierarchie von Zellen, Organen, Individuen, Arten etc. in natürlichen Systemen) (Reiner 1992).

Die methodische Zulässigkeit von Analogiebildungen zwischen natürlichen und gesellschaftlichen Systemen ist allerdings umstritten, insbesondere in Bezug auf die Übertragbarkeit von Prinzipien der natürlichen Evolution auf die menschliche Entwicklung. Dies betrifft z. B. die Frage nach den Selektionskriterien, will man nicht in einen naiven und möglicherweise zynischen Sozialdarwinismus verfallen. Aber auch der Unterschied, dass „die biologischen Variationen durch spontane Mutationen, die sozialen Varianten hingegen durch zielgerichtetes, strate-

gisches Handeln entstehen“ (Weyer 1997, S. 29), ist zu beachten. Auf jeden Fall ist bei der Analogiebildung zwischen natürlicher Selbstorganisation und der zielgerichteten Nutzung von Prinzipien der Selbstorganisation für menschliche Zwecke sorgfältig zu unterscheiden. Insbesondere muss beachtet werden, dass die Evolutionstheorie die Perspektive eines außen stehenden Beobachters der Evolution einnimmt (Gutmann 1996), während in den gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen Teilnehmer- und Entscheiderperspektiven mit ihren jeweiligen Zielen und Interessen relevant sind.

Sofern dies sorgfältig berücksichtigt wird und eine entsprechend kritische und vorsichtige Distanz zu einer naiven Analogiebildung eingenommen wird, spricht nichts dagegen, entsprechende Selbstorganisationsprinzipien gleichsam spielerisch zu erproben und zu erforschen, ob und inwieweit sich hieraus – im Sinne des bionischen Transfertgedankens – neue Ideen zur Lösung technischer Probleme generieren lassen.

Ameisenstrategie für die Routenplanung

Dies sei im Folgenden kurz am Beispiel des Ameisenrouting erläutert. Ameisen gelten als eine der klassischen natürlichen Populationen, in denen das kollektive Verhalten einer sehr großen Anzahl von Individuen spezifische Muster im Gesamtverhalten hervorbringt. Besonderes Interesse hat dabei das so genannte „Ameisenrouting“ gefunden (für das Folgende vgl. Nachtigall 2002, S. 397 ff.). Dieses bezieht sich auf die Organisation des Transports der Nahrung zum Ameisenbau. Unter der Prämisse, dass Ameisen wegen des Effizienzprinzips die kürzesten Wege verwenden, geht es um die Frage, wie diese kürzesten Wege bestimmt werden. Ameisen markieren die von ihnen verwendeten Wege durch die Abgabe eines Duftstoffs (Markierungspheromone). Sie legen Pheromonspuren, z. B. auch dann an, wenn sie um Hindernisse einen – zunächst rein zufälligen – Umweg machen. Im Laufe der Zeit werden die kürzesten Wege von mehr Ameisen benutzt, so dass die Pheromonspur stärker wird und weitere Ameisen dazu motiviert, ebenfalls diese markierten Wege zu benutzen (für die Algorithmisierung dieses Prinzips vgl. Boysen (2006). Der „Trick“ hierbei liegt darin, dass die Ameisen, die – zufällig – die kürzeren Wege benutzen, sich bereits früher auf den nächsten Weg machen können. So kommt es zu den bekannten „Ameisenstraßen“ (hier besteht offenbar eine enge methodische Verwandtschaft zu dem Prinzip der „evolutionären Programmierung“, welches in Kap. V.3.2 erläutert wurde). Komplexere Verhaltensmuster basierend auf der gleichen Grundidee bilden Erkundungsmuster von Ameisen in einer fremden Umgebung (wie z. B. von Wanderameisen oder von der Argentinischen Ameise (Nachtigall 2002, S. 399 f.). Die Stämme nutzen hierfür Kundschafterameisen, die ein kollektives Verhaltensmuster zeigen, was sich auf Wechselwirkungen auf der individuellen Ebene zurückführen lässt und ebenfalls auf der Markierung mit Pheromon beruht. Das komplexe Ausschwärmverhalten einer Ameisenkolonie kann damit auf der Basis relativ einfacher Regeln individuellen Verhaltens erklärt und modelliert werden.

Als Vorbild für technische Problemlösungen kommt dieses Ameisenrouting vor allem dann in Frage, wenn komplexe Routenplanungen erforderlich werden. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn autonome Roboter zusammenarbeiten sollen, z. B. um Rasen zu mähen oder Staub zu saugen. Hierbei geht es darum, eine Systemfunktion (flächendeckende Verrichtung der übertragenen Arbeit) zu realisieren, ohne den „einzelnen Elementen“ einen genauen Plan ihrer Tätigkeitsabfolge vorzuschreiben, und ohne dass die Gesamtfunktion zusammenbricht, wenn eines der Elemente ausfallen würde. (Diese Unabhängigkeit von Individuen ist übrigens eine der wichtigsten evolutionären Leistungen der Schwarmintelligenz.)

Andere und teils bereits eingesetzte Anwendungen bestehen in der Routenplanung für komplexere Anlieferungen, sozusagen in der Optimierung komplexer Reiserouten nach dem bekannten Modell des Handlungsreisenden. Nachtigall (2002) berichtet von einem „Ant collective optimization program Aco“, das Expeditionen hilft, ihre Routenpläne zu optimieren. Routenplanungen sind in der Logistik generell eine Herausforderung, aber zunehmend auch in der Datenwelt, wo z. B. die Optimierung von Datenrouten im Internet aus Effizienz- und Kapazitätsgründen ein Thema geworden ist. Auch in der Gestaltung industrieller Fertigungsprozesse können diese Gedanken Anwendung finden: „In einer Fabrik des zweitgrößten Aluminiumherstellers der Welt haben gleichsam elektronische Ameisen das Kommando übernommen; sie helfen, Maschinen, Schmelzöfen und Transportbänder präzise aufeinander abzustimmen. Mit dieser Steuerungssoftware, die sich wie ein Ameisenvolk verhält, konnte die Effizienz in einigen Bereichen bis zu 10 Prozent gesteigert werden“ (Nachtigall 2002, S. 398).

Ein weiteres Anwendungsbeispiel liegt in der Chipproduktion. Von Automaten müssen hunderttausende von Arbeitsschritten an den Chips vollzogen werden. Jeder Positionswechsel des Automaten erfordert, da eine gewisse Strecke zurückgelegt werden muss, eine bestimmte Zeitdauer. Wenn es also gelänge, einen Algorithmus zu finden, der die Positionswechsel auf einer kürzesten Route anordnet, würde die Produktionsdauer pro Stück minimiert und es könnten in der gleichen Zeit mehr Chips hergestellt werden. Aufgrund der hohen Fixkosten der Chipproduktion und der hohen Stückzahlen können auf diese Weise erhebliche Kostensenkungen realisiert werden. Auf analoge Weise lassen sich Ameisenalgorithmen auf eine ganze Reihe von kombinatorischen Optimierungsproblemen übertragen (<http://www.ameisenalgorithmus.de>).

Auch kann versucht werden, auf der Basis individueller Wechselwirkung kollektive Muster explorativ zu erforschen und damit sozusagen künstliche Ameisenvölker zu bauen: „MIT-Forscher haben fingergroße ‚Kunstameisen‘ gebaut, die Infrarotsignale abgeben und aufnehmen können. Mit einfachstem Datenaustausch konnte z. B. erreicht werden, dass die ‚Ameisen‘ einer ‚Leitameise‘ folgen oder sich – im Gelände frei beweglich – alle um eine ‚Futterquelle‘ sammeln“ (Nachtigall 2002).

Schwarmintelligenz

Das Schwarmprinzip besteht also darin, ein komplexes Problem dadurch einer Lösung zuzuführen, dass es einem Kollektiv übertragen wird, in dem die Individuen ausgesprochen einfachen Regeln folgen. Die resultierende „Schwarmintelligenz“ ist vor allem durch drei Eigenschaften gekennzeichnet: Flexibilität, Robustheit und Selbstorganisation. So verfügen z. B. staatenbildende Insekten über eine große Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Randbedingungen. Die entsprechenden „Völker“ sind so organisiert, dass sie robust gegenüber dem Ausfall oder Verlust von Individuen sind. Die evolutionäre Einheit ist das Kollektiv, nicht das Individuum. Die entsprechenden, für kollektive Verhaltensmuster erforderlichen Interaktionen erfolgen selbst organisiert, d. h. ohne eine zentrale Steuerungsinstanz.

Diese Mechanismen machen die Schwarmintelligenz interessant als Modell zur Lösung einiger Probleme kollektiven Verhaltens. So ist eine Frage, ob man daraus etwas für die Organisation aktueller Herausforderungen wie die bekannten Probleme des Straßenverkehrs lernen könnte. Seit den 1990er Jahren befasst sich die Verteilte Künstliche Intelligenz (VKI) mit der Adaptation derartiger Konzepte, wobei ein besonders wichtiger Anwendungsfall mittlerweile das Internet ist. Auch auf der Ebene der Unternehmensführung werden – in Absetzung von den klassischen tayloristischen Führungsprinzipien – Überlegungen zur Nutzung solcher evolutionärer Strategien angestellt: das Unternehmen der Zukunft als Schwarm (Bonabeau/Meyer 2001).

5. Fazit

Seit einiger Zeit ist eine Ausdehnung der Bionik in mehrere Richtungen zu beobachten. Dies betrifft zum einen die molekulare Welt, die mittels der Nanotechnologie zusehends technisch zugänglich und unter bionischem Erkenntnis- und Gestaltungsinteresse interessant wird. Hier ist ein besonders wichtiger und spezifischer Bereich die Schnittstelle zwischen Mensch und Technik in neueren Entwicklungen der Prothetik. Ferner werden Erkenntnisse der Evolutionstheorie in fortgeschrittenen Programmierstrategien und in innovativen Organisationsansätzen genutzt.

Nanobionik und/oder Nanobiomimetik bezeichnen Forschungsaktivitäten, die Lösungsansätze der Natur (bzw. der Zelle) für menschliche Bedarfe und Produktionen nutzbar machen. Diese Forschungsrichtungen sind molekularbiologisch orientiert und profitieren von Fortschritten in der Nanotechnologie. Entsprechende Entwicklungen befinden sich noch weit im Stadium der Grundlagenforschung, auch wenn es um so konkrete Ziele geht wie den technischen Nachbau der Photosynthese. Waren die bisher verfolgten bionischen Ansätze geprägt durch die Übertragung von Lösungsansätzen der Natur auf technische Systeme, so stehen im Rahmen der Nanobionik zugleich Eingriffe in die Natur auf dem Programm, die bis hin zum Bau künstlicher Zellen und damit letztlich zur Erzeugung künstlichen Lebens in der Synthetischen Biologie reichen. Die Analogiebildung der bishe-

rigen Bionik mit der Nanobionik erweist sich spätestens dann als problematisch, wenn in die evolutiven Prozesse selbst eingegriffen wird, wenn also „der Mensch die Evolution selbst in die Hand nimmt“. Mit der dadurch erfolgenden Verkürzung der natürlichen Zeiträume, in denen sich evolutive Prozesse vollziehen, könnten neue Risikotypen erzeugt werden. Trotz der Faszination der Nanobionik muss daher die Forderung nach sorgfältiger Begleitung durch Risikoforschung und Technikfolgenabschätzung erhoben werden.

Entsprechend den technologischen Möglichkeiten der jeweiligen Zeit wurden jahrhundertlang Prothesen entwickelt, die als bionisch charakterisiert werden können. Mittlerweile tragen die Fortschritte in der Prothetik zu einer Entwicklung bei, die von der morphologischen Analogiebildung (beispielsweise Hörrohr) über eine völlige Abstraktion und Abkehr vom Vorbild wieder zu einer kontinuierlichen Annäherung an die natürlichen Prozesse gelangt – ganz im Sinne des „Nachbaus“ der zugrunde liegenden komplexen sensorischen und informationsverarbeitenden Mechanismen. Es geht damit zunehmend um die mehr oder weniger exakte funktionale Nachbildung der Natur. Dieses „transitorische“ Verständnis der Bionik (von der Analogie zur Kopie) lässt sich anhand von Arm- und Beinprothesen oder von Zahnprothesen illustrieren. Mit dem zunehmenden Fortschritt der Wissenschaft nehmen das Bestreben und die wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten zu, ganze oder zumindest Teile von Gliedmaßen in der gewünschten (natürlicherweise eingesetzten) Funktionsweise nachzubilden. Hierbei sind große Erfolge zu verzeichnen, obwohl die exakte Kopie noch lange nicht erreicht ist.

Die Nutzung evolutionärer Strategien in der Informations- und Kommunikationstechnik im „Natural Computing“ operiert mit den Prinzipien von Variation und Selektion, um unter bestimmten Bedingungen „optimale“ Strategien durch Probieren herauszufinden. Dabei geht es darum, in Ergänzung zu oder Absetzung von klassischen Top-down-Ansätzen der Programmierung das „evolutionäre Optimum“ durch Ausprobieren einer großen Zahl von Möglichkeiten herauszufinden – statt durch sorgfältiges Softwaredesign. Diese Verfahren versprechen besonders für hoch komplexe Probleme neue und teils überraschende Lösungen.

In Fragen der Organisation komplexen Verhaltens, sei es des Verhaltens eines Kollektivs oder des Verhaltens Einzelner angesichts kombinatorischer Optimierungsaufgaben werden seit einiger Zeit Phänomene der „Schwarmintelligenz“ untersucht. Angestrebt wird, das komplexe Verhalten z. B. von Ameisenvölkern oder Vogelschwärmen auf der Basis sehr einfacher Regeln auf der individuellen Ebene zu modellieren und hieraus Lösungsideen für Probleme sozialer Organisation zu gewinnen. Das Ameisenrouting stellt die bekannteste und bislang am häufigsten angewendete Form dieser Schwarmintelligenz dar.

Grundsätzlich ist in diesen, technisch und wissenschaftlich sämtlich faszinierenden Feldern der „neuen Bionik“

zu beachten, dass erhebliche Potenziale für neuartige technische Möglichkeiten erkennbar sind, dass diese sich jedoch zum großen Teil noch in frühen Entwicklungsstadien befinden. Der bionische Gedankengang zielt hier zwar letztlich auf technische Problemlösungen, ist jedoch in der Regel noch weit von der Marktreife entfernt. Chancen und Risiken sind dementsprechend schwierig zu beurteilen; hierfür wären jeweils eigene Studien erforderlich. Klar ist jedoch bereits, dass das häufig verwendete evolutionäre Prinzip der Selbstorganisation eine eigene Ambivalenz aufweist und möglicherweise zu eigenen Risikotypen führen kann, die aus zunehmender Autonomie darauf aufbauender Technik und einem möglichen Kontrollverlust des Menschen resultieren könnten.

VI. Weiterführende Aspekte und Handlungsempfehlungen

Bionisch inspirierte Entwicklungen verweisen auf eine breite Palette möglicher Anwendungsfelder (z. B. smart materials, Fassadenfarben, Konstruktionsoptimierung). Bionische Ansätze ermöglichen auch neue technologische Lösungen (z. B. Natural Computing), die mit herkömmlichen Verfahren nicht realisiert werden können. Insgesamt gesehen ist das Feld bionischer Forschung stark fragmentiert. Deutschland steht im Forschungsfeld Bionik – bezogen auf die deutschsprachige Begriffsabgrenzung (im Vergleich zu „bionics“, s. Kap. II) – relativ gut da. Aufgrund der durch bionische Sichtweisen signifikant erweiterbaren Betrachtung technischer Möglichkeiten (heuristischer Aspekt), macht es auch weiterhin Sinn, Bionik entsprechend zu fördern. Die eingangs erwähnte These von der „Bionik als Versprechen“ (Bionik als eine Technik nach dem Vorbild der Natur, die damit ein Stück weit Versöhnung dieser Gegensätze auf einem hohen wissenschaftlich-technischen Niveau verspricht, s. Kap. II.2.3) stellt eine wichtige Motivation der Bionik dar, ist aber nicht verallgemeinerbar. Vielmehr sollte hier eine Bewertung nach einer Einzelfallprüfung im Kontextzusammenhang (oder auch nach Durchführung eines TA-Projektes) erfolgen.

Die vorliegende Vorstudie stellt eine Art „erste Felderfassung“ der Bionik für die parlamentarische Technikfolgenabschätzung im Sinne einer Vorstudie dar. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, was insbesondere die aufgeführten Beispiele und Forschungsfelder anbelangt. Vielmehr wurde versucht, anhand ausgewählter Forschungsfelder einen repräsentativen Querschnitt darzustellen. Eine Weiterführung des Projektes in der in der Vorstudie gewählten thematischen Breite und Vielfalt ist aus TAB-Sicht nicht zwingend erforderlich. Sofern eine Weiterführung gewünscht wäre, macht eher eine Vertiefung einzelner Themenfelder anhand spezifischer Aspekte (Kap. VI.2) Sinn.

Für die folgende Darstellung weiterführender Aspekte und Handlungsempfehlungen wurde partiell auf Ausführungen in UMSICHT (2005) und IÖW/GL (2005) zurückgegriffen.

1. Forschungs- und Handlungsbedarf

Für eine differenzierte Sicht auf die Bionik und die in diesem Bereich praktizierte Arbeitsweise ist es unabdingbar, den gesamten Prozess von den biologischen Grundlagen bis hin zur technischen Umsetzung zu betrachten, um das Potenzial der Bionik realistisch darzustellen zu können. Für eine erfolgreiche Etablierung der Bionik als Innovationsinstrument sind deshalb neben der weiteren intensiven wissenschaftlichen Forschung eine gezielte Öffentlichkeitsarbeit und konzertierte Bildungsmaßnahmen eine wichtige Voraussetzung.

Als Ausgangspunkt und Hintergrund der nachfolgenden Betrachtung soll eine stichwortartige Zusammenstellung ausgewählter Hemmnisse fungieren (s. a. Kap. III u. IV):

- Unkenntnis über bionische Lösungswege bei potenziellen Anwendern; Unterschätzung der Leistungsfähigkeit bionischer Produkte und Prozesse (Wahrnehmungsproblem); Mangel an Kommunikation sowohl in Fachkreisen als auch in der breiten Öffentlichkeit;
- Skepsis auf Seiten der Industrie, in umfassende Bionik-Projekte zu investieren (Bevorzugung der Verwertung von Ergebnissen, z. B. von Patenten);
- bei erfolgreichen Innovationen erfolgt oft eine Marktbesetzung durch Großunternehmen (Nachteil für Forscher und KMU); Finanzierung bei KMU (Förderung, Kredite) generell schwieriger;
- prinzipielle Problematik des „Plazierens grundlegender, revolutionär neuer Ideen“ in Industrie und Gesellschaft (enormer Arbeitsaufwand erforderlich, der zum Teil gescheut wird);
- unterschiedliche Sichtweisen von Bionikern und Industrie (Bioniker „stellen ihr Wissen bereit“, die Verwertung des Wissens erfolgt durch andere; (Veröffentlichungen erfolgen meist in der Fachsprache und nicht mit umgangssprachlichem oder industriellem Focus);
- Probleme beim Schutz geistigen Eigentums vor allem im Hochschulbereich (fehlende Schutzrechts-, Lizenzrechts- und Vertragskenntnisse; hoher Kostenaufwand; mangelnde Erfahrung bei Verhandlungen etc.);
- zum Teil tradierte eindimensionale, wenig vernetzte Denkkultur in Universitäten und Industrie (psychologische Barrieren, Festhalten am Bekannten);
- Ungleichgewicht zwischen Förderung von Bionik-Projekten und von seit Jahrzehnten betriebenen technischen Großprojekten.

Integration von Bionik in den Innovationsprozess

Wesentlich ist die Integration von Bionik in den gesamten Innovationsprozess – von der Idee bis zum Produkt. Hier spielen sowohl Aspekte der Interdisziplinarität als auch der Marktrelevanz bionischer Produkte eine Rolle.

Um Bionik als „Ideenpool“ für Innovationen (auch vor dem Hintergrund sich verändernder Produktlebenszyklen) zu etablieren, ist eine grundlegende Voraussetzung – zur Nutzung der in optimierten biologischen Strukturen

verborgenen Informationen und gefundenen Lösungen für technische Anwendungen – das Entwickeln von Strategien zum effizienten Herausfiltern der für technische Problemlösungen relevanten Aspekte. Hier scheint eine weitere Systematisierung biologischer Prinzipien vor dem Hintergrund branchenspezifischer Innovationsprozesse (unter Einbindung von Unternehmen, Verbänden, Wissenschaft etc.) sinnvoll zu sein. Beispielsweise könnte ein Benchmarking-Projekt durchgeführt werden, in welchem – durch differenzierte Vergleiche mit anderen Ländern und Analysen erfolgreicher nationaler Bionik-Projekte – spezifische Stärken und Schwächen (Hemmnisse) in der Analogie- und Abstraktionsbionik sowie in der Übertragung auf die Technik herausgearbeitet werden.

Interdisziplinarität

Eine funktionierende interdisziplinäre Arbeitsweise ist ein zentraler Baustein bionischer Entwicklungen. Mit der Zunahme des Wissens über bionische Zusammenhänge nimmt die Komplexität neuer Entwicklungen weiter zu, so dass ohne eine enge Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus verschiedenen Disziplinen (Biologen, Physikern, Chemikern etc.), Ingenieuren, Technikern und Architekten während des gesamten Forschungs- und Entwicklungsprozesses⁶⁴ eine Produktumsetzung (vom biologischen Vorbild bis hin zum marktreifen bionischen Produkt) heute nicht mehr möglich ist. Dennoch zeigen auch erfolgreiche Kooperationen bei bionisch inspirierten Entwicklungen von technischen Produkten, dass der Informationstransfer zwischen den Disziplinen noch weiter ausbaubar ist – insbesondere auch, um zu vermitteln, was Bionik genau ausmacht und wie sie erfolgreich eingesetzt werden kann. Hier fehlen grundlegende Untersuchungen, was eine effiziente Kommunikation zwischen Ingenieurwissenschaften und Biologie ausmacht und wie kommunikative Defizite überwunden werden können.

Netzwerke spielen eine wesentliche Rolle in der Kommunikation u. a. von Forschungsergebnissen (Kap. III.2.5). Sie weisen zudem auf eine Bündelung von Kompetenzen hin. Die momentan in Deutschland bestehende Netzwerkbildung sollte – auch mit Blick auf interdisziplinäre Aspekte und die europäische Ebene – weitergeführt werden. Für den Informationstransfer könnten darüber hinaus geeignete Plattformen geschaffen werden.

Markt für bionische Produkte

Das Anwendungspotenzial der Bionik ist enorm breit. Dennoch ist die derzeit auf dem Markt anzutreffende (bionisch inspirierte) Produktvielfalt eher überschaubar. Festgehalten werden kann jedoch, dass ein entsprechen-

⁶⁴ Dieser umfasst alle Schritte im Prozess des bionischen Arbeitens: vom Prinzipverständnis (d. h. dem Erfassen der biologischen Problemlösung, zu Grunde liegender Strukturen, Funktionen auf quantitativer und reproduzierbarer Ebene) über die Abstraktion (lösen der gefundenen Prinzipien vom biologischen Vorbild) bis hin zur technischen Umsetzung (Labormaßstab, Pilotmaßstab, industrielle Anbindung). Voraussetzung für eine Herstellung im industriellen Maßstab ist eine erfolgreiche Markteinführung von bionischen Produkten (kooperierende Firmen, Akzeptanz beim Verbraucher).

des Marktpotenzial vorhanden ist. Allerdings wären für einzelne Anwendungsfelder bzw. Branchen die Durchführung detaillierter Marktuntersuchungen (inkl. Primärdatenerhebung) erforderlich, um sich ein konkreteres Bild machen zu können.

Ein weiterer Aspekt ist der Transfer bzw. die Nutzbarmachung von bionischen Entwicklungen für Umsetzungen im Handwerk bzw. im Mittelstand. Hier fehlen regionale oder auch überregionale (virtuelle) Cluster aus FuE-Einrichtungen und kleinen und mittleren Unternehmen mit klaren Projektaufträgen, Zeit- und Kostenplänen sowie Ergebnisverantwortung (z. B. in Form von Projekthäusern). Diese könnten dazu beitragen, bionische Entwicklungen zeitnäher zum Produkt zu führen. Hier fehlen grundlegende Erfahrungen, da es derzeit in Deutschland keine entsprechenden Technologiezentren oder Zusammenschlüsse gibt. Modellhafte Struktur- und Arbeitsplanungen könnten im Vorfeld Unterlagen zur Einrichtung solcher Cluster bereitstellen.

Fokussierung der Forschungsorientierten Förderung

Ein weiterer Punkt ist die Fokussierung der forschungsorientierten Förderung auf einzelne Aspekte (z. B. auf Fragen der Wissensverwertung, wie die unabdingbare Integration von Schutzrechtsstrategien in bionische Projekte mit Blick auf die Ergebnisverwertung). Darüber hinaus könnten Förderprogramme mit Blick auf bionische Belange entsprechend nuanciert angepasst werden (z. B. Fortführung von Machbarkeitsstudien, finanzielle Begünstigung bionischer Anwendungsprojekte als Verbundvorhaben in Ausschreibungen). Zudem könnten neue Schwerpunkte gesetzt werden, z. B. Aufbau eines DFG-Schwerpunktes zu biologischen Grundprinzipien, oder Gründung einer AiF (Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen)-Mitgliedsvereinigung.

Darüber hinaus treffen hier auch Forderungen zu, die oft insgesamt an die Forschungsförderung gestellt und partiell auch bereits umgesetzt werden (z. B. Belohnung von Grundlagenforschung, die zu Produkten führt; Festlegung von Gütekriterien für „bionische“ Projektanträge und Projekte; Schaffung unbürokratischer Finanzierungsinstrumente in Kooperation mit der Industrie).

Bionik in der Öffentlichkeit

Bionik ist in der breiten Öffentlichkeit – sofern bekannt – wie in den Medien thematisch eher positiv besetzt. Diese Basis wäre ausbaubar vor dem Hintergrund der Vermittlung eines klareren Bildes davon, was Bionik genau ausmacht. Dieses Verständnis wäre u. a. auch eine Grundlage für eine bessere Verankerung bionischer Aspekte in Lehre und Ausbildung. Um Bionik für eine breite Öffentlichkeit nachvollziehbarer zu vermitteln, bieten sich u. a. große Modelle (Exponate zum Anfassen), entsprechende (Computer-)Spiele, Internetplattformen, Wanderausstellungen, Berichte in den Medien etc. an. Bionik könnte auch bei Wissenschaftsveranstaltungen präsenanter gemacht werden. Eine sichtbare Verankerung von Bionik als Bestandteil möglicher Lösungsstrategien für Zukunftsfragen (etwa in

Gremien wie Sachverständigenrat etc.) könnte ebenfalls zu einer besseren öffentlichen Wahrnehmung beitragen.

Lehre und Ausbildung

Für eine breitere Verankerung von Bionik auf allen Stufen von Lehre und Ausbildung bietet es sich z. B. an, „Bionik als Denkmodell“ zu etablieren. Bionik ließe sich auch im naturwissenschaftlichen Unterricht (als fächerübergreifendes Themenfeld) zwischen den Einzelfächern ansiedeln. Dazu gehört auch eine bessere Darstellung der Bionik in den Lehrbüchern, der Start von Disziplinen vernetzenden Projekten/Unterrichtsreihen in Kindergärten und Schulen, eine adäquate Aufbereitung bionischer Aspekte für Berufsschulen (und für Umsetzungen im Handwerk) oder auch die Weiterbildung von Bionik-Forschern in Projektmanagement und Vertragswesen. Eine technisch-wirtschaftliche Analyse hinsichtlich nachweisbarer volkswirtschaftlicher Effekte der Bionik könnte eine lenkende Wirkung auf die bearbeiteten Inhalte einzelner Fachdisziplinen haben.

Folgenanalysen

Auf der Basis der bisher gewonnenen Einsichten böten sich eine Reihe spezifischer Fragestellungen in folgenden Vertiefungsfeldern an:

- Ökobilanzielle Themen sind in der Bionik noch nicht untersucht worden. Daher könnten weiterführende Gesamtbetrachtungen bionischer Produktanwendungen (u. a. hinsichtlich der Frage, ob die in der praktischen Umsetzung gewählten Materialien und Verarbeitungsschritte dem „bionischen Versprechen standhalten“) in die Bewertungsdiskussion integriert werden.
- Für den gesamten Bionik-Bereich besteht generell Bedarf einer Schärfung der hier getroffenen Aussagen zu „Chancen und Risiken“ (evtl. differenziert nach etablierter und neuer Bionik).
- Es besteht weiterhin ein spezifischer Wissensbedarf im Bereich der „neuen Bionik“:
 - Inwieweit kann die generelle Unterstellung („Bionik als Versprechen“, die im jeweiligen Kontext nochmals überprüft werden sollte) bei der sog. „High-Tech-Bionik“ aufrechterhalten bleiben. Welches wären die Kriterien und Bewertungsmethoden (bzw. Leitvorstellungen)?
 - Können die mit der Bionik bisher eher nur implizit verbundenen Vorstellungen (z. B. Robustheit, Fehlertoleranz, Adaptivität) auch im Bereich der ›neuen Bionik‹ (besser) realisiert werden, wenn sie nicht nur unausgesprochen transportiert, sondern im Rahmen explizit formulierter Leitbilder bewusst verfolgt werden?
 - Forschungsbedarf besteht auch im Hinblick auf die „Eingriffstiefe“ und „Wirkmächtigkeit“ der „neuen Bionik“ auf der molekularen Ebene und die damit zusammenhängenden Risiken.

- Detailuntersuchungen könnten in diesem Sinn für einzelne Bereiche durchgeführt werden. Ein „Beispiel“ wäre hier die Nanobionik, wo neben vorgeannten Punkten u. a. Aspekten der „Selbstorganisation“ (inkl. notwendigem Regulierungsbedarf) nachgegangen werden könnte. Ein anderes Beispiel ist die Prothetik. Hier könnten weiterführende Untersuchungen u. a. das Themenfeld „enhancement“ integrieren.
- Eine weitere Vertiefungsmöglichkeit ist eine differenzierte Vergleichsanalyse (Innovationsforschung, Informationsfluss, Wissenstransfer, Analyse erfolgreicher Bionik-Projekte etc.) mit anderen Ländern, um spezifische nationale Stärken und Schwächen (Hemmnisse) herauszuarbeiten (Benchmark).
- Zudem könnten durch eine andere Herangehensweise an die Thematik neue Ideen generiert werden, etwa wenn man Bionik weniger aus der technologischen Sicht betrachtet, sondern von der Anwendungsseite bzw. der Problemlösungsperspektive her kommend (z. B. ausgehend von aktuellen ökologischen Problemen, etwa im Bereich Bauen und Wohnen oder beim Leichtbau von Automobilen, ausloten, inwieweit bionische Ansatzpunkte hier weiter helfen könnten).

Literatur

1. In Auftrag gegebene Gutachten

IÖW/GL (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung gGmbH/Universität Bremen, Technikgestaltung und Technologieentwicklung) (2005): Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik, Themenfeld 2: Die Nähe zur Natur als Chance und als Risiko, (Autoren vom IÖW: Rüdiger Haum, Olga Levina, Ulrich Petschow, Autor von TTE: Arnim v. Gleich), Berlin

UMSICHT (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik) (2005): Bionik als Technologievision der Zukunft: Status aktueller und zukünftiger Anwendungen; Bionik für Neue Materialien in der Verfahrens-, Umwelt- und Bautechnik sowie im Fahrzeugbau; internationale Aspekte. Gutachten Bionik als Technologievision der Zukunft (Autoren: Jürgen Bertling, Hartmut Pflaum, Marcus Rechberger, Manuela Rettweiler), Oberhausen

2. Weitere Literatur

Aachener Kompetenzzentrum (2005): Innovationspotenzial von Schlüsseltechnologien. http://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/_media/MTStudieII_Kap10.pdf

Advanced Bionics (2005): Internetseiten der Firma Advanced Bionics. Sylmar (CA, USA). <http://www.advancedbionics.com>, abgerufen am 06.09.2005

Andres, M.-S. (2005): Technik aus der Natur. In: brand eins 03/2005, S. 53–56. https://www.brandeins.de/ximages/19238_052innovat.pdf

Arzt, E., Gorb, St. (2005): Kleben ohne Klebstoff. Max-Planck-Institut für Metallforschung, <http://www.bio-pro.de/de/region/stern/magazin/01779/index.html>, abgerufen am 08.03.2006

ASHA (American Speech-Language-Hearing Association) (2004): Technical report: cochlear implants. ASHA Supplement 24. <http://www.asha.org>

Askeland, D. R. (1996): Materialwissenschaften. Berlin/Oxford

Ayre, M. (2004): Biomimicry – A Review. European Space Agency, http://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ACT_RPR_6000_BIO_Review_AYRE.pdf

Balaban, T. S., Buth, G. (2005): Biomimetische Lichtsammlung. In: NACHRICHTEN – Forschungszentrum Karlsruhe 37, S. 204–209

Ball, P. (2001): Life's lessons in design. Nature 409, S. 413–416

Ball, P. (2005): Synthetic biology for nanotechnology. Nanotechnology 16, R1–R8

Bar-Cohen, Y. (2001): Nanotechnology Using Electroactive Polymers as Artificial Muscles. In: MSTnews, International Newsletter on Microsystems and MEMS 3/01, S. 45–46

Bar-Cohen Y. (ed.) (2005): Biomimetics: Mimicking and being Inspired by Biology. Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, March 7-10, 2005, San Diego (CA, USA)

Barthlott, W. (2005): Lotusblumen und Automobile. Die Natur als Vorbild für technische Innovationen. In: 2. Fachtagung: Bionik im Automobil am 6. und 7. 12. 2006 in Ulm

Barthlott, W. (2006): Der Lotus-Effect® – die Natur als Vorbild für technische Innovationen. In: BIODON 2006

BASF (BASF AG) (2002): Pressemitteilung „Nanostrukturen mit Lotus-Effekt: Bausteine für superhydrophobe Beschichtungen“ vom 28./29.10.2005. http://www.corporate.basf.com/basfcorp/img/innovationen/felder/nanotechnologie/d/t_021206_keller.pdf, abgerufen am 10.10.2005

Bauzentrale (2004): ERLUS Lotus – das erste selbstreinigende Tondach der Welt. Mitteilung der Bauzentrale vom 25.05.2004. <http://www.bauzentrale.com>, abgerufen am 14.10.2005

BD Biosciences (2006): BD Cell-Tak™ Cell and Tissue Adhesives. http://www.bdbiosciences.com/discovery_labware/products/display_product.php?keyID=227, abgerufen am 28.03.2006

Benner, S.A., Sismour, A.M. (2005): Synthetic Biology. In: Nature Reviews/Genetics 6, S. 533–543

Bensaude-Vincent, B. (2004): Two Cultures of Nanotechnology? In: HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry 10, S. 65–82

Bernstein, A., Henning, S., Hube, R., Schietsch, U., Hein, W. (2001): Analysis of the Interface between Bone and Biomaterial. In: Bischoff, G., Hein, H.-J. (Hg.): Micro- and Nanostructures of Biological Systems. Aachen

BIOKON (Bionik-Kompetenz-Netz e.V.) (2005a): Internetseiten des Biokon-Kompetenznetzes. <http://www.biokon.net>, abgerufen am 13.09.2005

BIOKON (Bionik-Kompetenz-Netz e.V.) (2005b): Verbundvorhaben Biokon II. Gesamtbericht Januar bis Juni 2005, Berlin

BIOKON (Bionik-Kompetenz-Netz e.V. (Hg.)) (2006): Bionik Industriekongress 2006. Innovationsmotor Natur. Tagungsunterlagen vom 1. und 2. März 2006, Berlin

Biomimetik (Kompetenznetzwerk Biomimetik) (2005): Internetseiten des Kompetenznetzes Biomimetik. <http://www.biologie.uni-freiburg.de/biomimetik/>, abgerufen am 05.08.2005

Biomimetik (Kompetenznetzwerk Biomimetik) (2006): Biomimetische Entwicklung von technischen Textilien für Flüssigkeitsferntransport basierend auf Wasserleitstrukturen von Holzpflanzen. <http://www.biologie.uni-freiburg.de/biomimetik/projekttextilien.htm>, abgerufen am 06.03.2006

Bionale (2005): Internetseiten des Vereins „Bionale – Lernen von der Natur e.V.“. <http://www.bionale-ev.de>, abgerufen am 27.07.2005

- Bionics Symposium (1960): Bionics Symposium: living prototypes – the key to a new technology. WADD Technical Report 60–600, 13-15 September 1960, Ohio
- Bionis (2005): Internetseiten des „The Biomimetic Network for Industrial Sustainability“. <http://www.extra.rdg.ac.uk/eng/BIONIS/>, abgerufen am 15.09.2005
- Biopro (biotech/Lifesciences Portal Baden Württemberg) (2006): Ein „technischer“ Pflanzenhalm als Ergebnis bionischer Forschung. <http://www.bio-pro.de/de/region/freiburg/magazin/01019/index.html>, abgerufen am 08.03.2006
- BitZ (Biotechnik-Zentrum Darmstadt) (2005): Internetseiten des Biotechnik-Zentrums Darmstadt (BitZ) an der Technischen Universität Darmstadt. <http://www.tu-darmstadt.de/bitz/index.html>, abgerufen am 04.08.2005
- Blüchel, K.G. (2005): BIONIK – Wie wir die geheimen Baupläne der Natur nutzen können. München
- Blume, S. (2000): Land of Hope and Glory: Exploring Cochlear Implantation in the Netherlands. In: Science, Technology and Human Values 25 (2), S. 139–166
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2000): Bekanntmachung von Förderrichtlinien für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet „Biomimetische Werkstoffe“ – Herstellung, Verarbeitung, Anwendung – im Rahmen des Programms „Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts – MaTech“. <http://www.fz-juelich.de/wing/datapool/page/19/bek-bio.pdf>
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2005a): Bekanntmachung von Förderrichtlinien zum Ideenwettbewerb „BIONIK – INNOVATIONEN AUS DER NATUR“ im Rahmenprogramm „Biotechnologie – Chancen nutzen und gestalten“, 20.09.2005–15.12.2005. <http://www.bmbf.de/foerderungen/5114.php>, abgerufen am 04.10.2005
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (Hg.) (2005b): Innovationen aus der Natur – Förderkonzept Bionik. http://www.bmbf.de/pub/innovationen_aus_der_natur_bionik.pdf, abgerufen am 04.10.2005
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (Hg.) (2005c): Regenerative Medizin und Biologie. Die Heilungsprozesse unseres Körpers verstehen und nutzen, Berlin
- BMBW (Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft) (Hg.) (1970): Bionik – Studie über ein Förderungsprogramm, Schriftenreihe Neue Technologien 1, Bonn
- Boeing, N. (2006): Projekt Genesis. In: DIE ZEIT 8/2006, S. 35
- Bonabeau, E., Meyer, Chr. (2001): Schwarm-Intelligenz: Unternehmen lernen von Bienen und Ameisen. In: Harvard Business Manager (6), S. 38–49
- Boysen, N. (2006): Ameisenalgorithmen. Universität Hamburg, Institut für Industriebetriebslehre und Organisation. <http://www.ameisenalgorithmus.de/downloads/ameisenalgorithmen.pdf>, abgerufen am 28.03.2006
- Braun, K. (2005): Vom Traum des Menschen zum Klettverschluss – Geschichtliches zur Bionik. <http://www.biokon.net/bionik/download/HistorischesZurBionik.pdf>
- Bristol, M. (ed.) (2005): The Evolution of Prosthetics. Vanguard
- Brownlee, J. (2005): On Biologically inspired Computation. Australia Centre for Intelligent Systems and Complex Processes (CISCP), Faculty of Information and Communication Technologies (ICT), Swinburne University of Technology. Technical Report ID 5-02, Victoria
- BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2003): Kommunikations- und Informationstechnik 2010+3: Neue Trends und Entwicklungen in Technologien, Anwendungen und Sicherheit. <http://www.bsi.de/literat/studien/trend2010/>
- Buehler, M., Grimminger, F., Campbell, D., Raibert, M. (2006): Biologically inspired robots at Boston Dynamics. In: BIONIK 2006, S. 39-48
- Burgdorf, M. (2001): Bionik sorgt im ContiSportContact 2 für Höchstleistungen. Pressemitteilung vom 05.02.2001. http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continental/portal/themen/presse_services/pressemitteilungen/produkte/reifen/pkw/pr_2001_02_05_3_de.html
- CAS (Chinese Academy of Sciences) (2005): Nanotube films as sticky as a gecko's foot. Pressemitteilung vom 23.09.2005. <http://english.cas.cn/Eng2003/news/detailnewsb.asp?infoNo=25695>, abgerufen am 06.10.2005
- Castells, M. (2001): Das Informationszeitalter I. Der Aufstieg der Netzwerkgesellschaft. Das Informationszeitalter. Wirtschaft – Gesellschaft – Kultur, Wiesbaden
- Cerman, Z., Striffler, B.F., Barthlott, W. (2004): Superhydrophobe biologische Grenzflächen – Ein mögliches Potenzial für hydrodynamische technische Innovationen. Kurzbericht BMBF-Ideenwettbewerb „Bionik – Innovationen aus der Natur“, Berlin
- Christensen, W.D., Bickhard, M.H. (2002): The Process Dynamics of Normative Function. In: Monist 85(1), S. 3–28
- Cochlear (2005): Internetseiten der Firma Cochlear Lane Cove (Australien). <http://www.cochlear.com>, abgerufen am 06.09.2005
- Conrad, M. (1988): The price of programmability. In: Herken, R. (ed.): The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey, S. 285–307, Oxford
- Dailami, J. (2002): The Myoelectric Arm: It's Electrifying. In: ILLUMIN. A review of engineering in everyday life 7(ii), <http://illuminate.usc.edu/article.php?articleID=6>
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2004): „Lehrmeister Natur“ seine Geheimnisse entlocken und für die Umwelt nutzbar machen – Deutsche Bundesstiftung Umwelt legt in ihrem Stipendienprogramm neuen thematischen Schwerpunkt auf die junge Wissenschaft Bionik. Presseinformation vom 10.02.2004. <http://www.dbu.de/press/artikel834.html>, abgerufen am 05.10.2005

- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2005): Lübeck: Deutsche Bundesstiftung Umwelt verlieh heute zum 13. Mal ihren Deutschen Umweltpreis. Presseinformation vom 15.10.2005, <http://www.dbu.de/press/artikel1090.html>, abgerufen am 15.10.2005
- de Casto, L. N. (2005): Biological Inspired Computing. Presentation for the International Symposium on Bio-Inspired Computing, 6. September 2005, Johor
- Deutschlandradio (2005): Pack die Badehose ein! – Bonner Bioniker erforschen nicht benetzbare Strukturen. In: Forschung Aktuell vom 01.08.2005, Sendung des Deutschlandfunks, <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/402118/>, abgerufen am 19.08.2005
- DFG (Deutsche Forschungs-Gemeinschaft) (2005): Prinzipien der Biomineralisation. Schwerpunktprogramm der DFG <http://spp-biomineralisation.de/cgi-bin/index.pl?Option1=Logo&Option2=Startseite>
- Edwards, S.A. (2005): Nanobiomedical Technology: Financial, Legal, Clinical, Political, Ethical, and Societal Challenges to Implementation. In: Kumar C.S.S.R., Hormes, J., Leuschner C. (eds.): Nanofabrication Towards Biomedical Applications: Techniques, Tools, Applications, and Impact. S. 391–414, Weinheim,
- EU (European Commission) (2004): Opinion on the State of the Art Concerning Tissue Engineering. Brussels
- EU (European Commission) (2005): Synthetic Biology – Applying Engineering to Biology. Report of a NEST High-Level Expert Group, DG Research, Brussels
- Europäisches Industriemuseum (2005): Symposium Hochleistungskeramik. http://www.gahlk.de/images/programm_HLK.pdf
- European Commission/US National Science Foundation (2001): Bio-inspired information technologies. Workshop Report, Brussels
- FhG (Fraunhofer-Gesellschaft) (2004): FuE-Portfolio der Fraunhofer-Gesellschaft – Das Basispapier. Interner Bericht, München
- FhG (Fraunhofer-Gesellschaft) (2005): Internetseiten der Fraunhofer-Allianz Optisch-funktionale Oberflächen. <http://www.funktionale-oberflaechen.de>, abgerufen am 12.10.2005
- Forth, E., Schweitzer, E. (1971): Das biologische Objekt als Vorbild der Technik. In: msr 14, S. 130–134
- Frisch, F. (2004): Wie Nanotechnologie das Auto veredelt. In: JOT (Journal für Oberflächentechnik) 9, S. 56–61
- Frost & Sullivan (ed.): Advanced Coatings & Surface Technology Alert. Nonequilibrium Microstructures; Antibiofouling Nanosurface Coatings, In: Intercoat Adhesion Failure, veröffentlicht am 19.08.2005. <http://marketinsights.frost.com/prod/servlet/market-service-segment.pag?segid=D744-00-11-00-00>
- Gaggioli, A., Vettorello, M., Riva, G. (2003): From Cyborgs to Cyberbodies: The Evolution of the Concept of Techno-Body in Modern Medicine. In: PsychNology Journal 1(2), S. 75–86
- Gekeler, F., Zrenner, E. (2005): Stand des subretinalen Implantatprojekts. Eine Übersicht. In: Der Ophthalmologe 10, S. 941–949
- Geoscience-online (2002): Online-Artikel „Mit Haken und Ösen – Naturpatent Klettverschluss“, „Rillen gegen Reibung – Haifischhaut hilft Sprit sparen“, „Sauberkeit dank Lotus-Effekt – Mikrostrukturen auf dem Vormarsch“, „Denken lernen von der Natur – Heuschreckenbeine, neuronale Netze und virtuelle Evolution“, Magazin geoscience-online.de vom 21.03.2002. http://www.g-o.de/index.php?cmd=focus_detail2&f_id=61&rang=11, abgerufen am 02.09.2005
- Glansdorff, P., Prigogine, I. (1971): Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. New York
- Glass, R. L. (2004): Learning to distinguish a solution from a problem. In: IEEE Software 21(3), S.111–112
- Goodsell, D. S. (2004): Bionanotechnology: Lessons from Nature. Hoboken (New Jersey)
- Gorb, St. (2006): Klebfreies Haften in der Natur und seine technische Anwendung. Vortrag auf dem Bionik Industriekongress 2006. Innovationsmotor Natur, Tagungsunterlagen vom 1. und 2. März 2006, Berlin
- Grathwohl, G. (2004): Von Biokeramiken und Nanocomposites – Neue Herausforderungen der technischen Keramik. In: Neue Keramik: Aufbruch in Biosphäre und Nanowelt. Bremer Universitätsgespräche, Bremen
- Greil, P. (2002): Keramik läuft zu Höchstform auf. In: Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbände (Hg.): Zukunft im Brennpunkt, Bd. 1, München
- Grunwald, A., Banse, G., Coenen, Chr., Hennen, L. (2005): Internet und Demokratie. Endbericht zum TA-Projekt „Analyse netzbasierter Kommunikation unter kulturellen Aspekten“, Berlin
- GTBB (Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik) (2005): Internetseiten der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik Saarbrücken. <http://www.uni-saarland.de/fak8/bi13wn/indgtbb.html>, abgerufen am 26.08.2005
- Gutmann, M. (1996): Die Evolutionstheorie und ihr Gegenstand. Berlin
- Hamburger Abendblatt (2005): High-Tech-Hand für Unfallopfer. Veröffentlicht am 06.07.2005. <http://www.abendblatt.de/daten/2005/07/06/456059.html>, abgerufen am 04.08.2005
- 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 II – from Molecules to Applications. (293. WEH-Seminar) In: Physik Journal 2(2), S. 56

- Harder, D. (2005): Persönliche Mitteilung von Dr. Dean Harder (Plant Biomechanics Group, Botanischer Garten, Universität Freiburg) an UMSICHT vom 12.10.2005
- Hauschildt, J. (1997): Innovationsmanagement. München
- Heckl, W.M. (2004): Molecular Self-Assembly and Nanomanipulation – Two key Technologies in Nanoscience and Templating. *Advanced Engineering Materials* 6(10), S. 843–847
- Herr, H., Whiteley, G., Childress, D. (2003): Cyborg Technology – Biomimetic Orthotic and Prosthetic Technology. In: Bar-Cohen, Y., Breazeal, C. (eds.): *Biologically Inspired Intelligent Robots*. Bellingham, Washington
- Hertel, H. (1967): Biologisch-technische Forschungen über Strukturen. In: *VDI Zeitschrift* 109, S. 793–795
- Heydemann, B. (2004): Vielfalt im Leben. Biologische Diversität. Vorbilder für die Ökotechnik, Niekritz, Kiel
- Holling, C.S. (1973): Resilience and stability of ecological systems. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, S. 1–23
- Hoppe, R. (2000): Keramik aus Holz. Universität Augsburg. <http://www.innovations-report.de/html/berichte/materialwissenschaften/bericht-1246.html>
- Hornbogen, E. (1994): Werkstoffe – Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Berlin u. a.O.
- Huber, J. (1995): Nachhaltige Entwicklung. Strategie für eine ökologische und soziale Erdpolitik, Berlin
- IFAM (Institut für Fertigungstechnik und Materialforschung) (2006a): Klebstoffe und Polymerchemie. http://www.ifam.fhg.de/2804/polymerchemie/projekte/bioadhaesion/projekt_polymerchemie_bioadhaesion.pdf, abgerufen am 28.03.2006
- IFAM (Institut für Fertigungstechnik und Materialforschung) (2006b): Proteinbasierte Materialien. http://www.ifam.fhg.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-DE-Polymerchemie-Proteinbasierte_Materialien.pdf, abgerufen am 28.03.2006
- IKTS (FhG-Institut für keramische Technologien und Strukturen) (2004): Jahresbericht 2004. <http://www.ikts.fraunhofer.de/publications/jahresberichte/jb2004/profil.html>
- IKTS (FhG-Institut für keramische Technologien und Strukturen) (2006): Forschungsfeld Biogene Keramik <http://www.ikts.fraunhofer.de/business/strukturkeramik/sonderwerkstoffe/biokeramik/index.html>
- Innovationsreport (2005): Dächer, Türme und Hallen mit Grips. http://www.innovations-report.de/html/berichte/architektur_bauwesen/bericht-40455.html, abgerufen am 16.02.2005
- Johnson, A.T., Schreuders, P.D. (2003): Bringing life to engineering: biological engineering at the graduate level. In: *European Journal of Engineering Education* 28(1), S. 37–46
- Jones, R.A.L. (2004): *Soft Machines*. Nanotechnology and Life, Oxford
- Joy, B. (2000): Why the Future doesn't need us. In: *Wired*, April 2000, http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy_pr.html; abgerufen am 08.02.2003
- Jung, C. (2004): Die Erweiterung der Mensch-Prothesen-Konstellation. Eine technografische Analyse zur „intelligenten“ Beinprothese. Technical University Technology Studies Working Papers TUTS-WP-1-2004, http://www.tu-berlin.de/~soziologie/Tuts/Wp/TUTS_WP_1_2004.pdf, Berlin
- Kephart, J. O. C. (2003): The Vision of Autonomic Computing. In: *IEEE Computer* 36(1), S. 41–50
- Kesel, A.B. (2005): Kleben, Haften und Verbinden: Klebertechnologie nach biologischem Vorbild. In: 2. Fachtagung Bionik im Automobil, 6. und 7. Dezember 2005, Ulm
- Kistenfeger, M. (2005): Bionics – a New R&D Trend in Germany. In: British Embassy Berlin (ed.): *S&I Note No 013.05(M)*, veröffentlicht am 18.07.2005, [http://www.britischebotschaft.de/en/embassy/s&i/notes/si-note05.3015\(m\)_bionics.htm](http://www.britischebotschaft.de/en/embassy/s&i/notes/si-note05.3015(m)_bionics.htm), abgerufen am 15.09.2005
- KI (Kunststoffinstitut Lüdenscheid) (2005): Lotus-Effect auf Kunststoffteilen. <http://www.kunststoffinstitut.de/inhalte/downloads.php>
- Klug, S., Stryk, O. von, Möhl, B., Karguth, A. (2006): Bionische Manipulatoren, In: *Bionik Industriekongress 2006*. Innovationsmotor Natur. Tagungsunterlagen vom 1. und 2. März 2006, CD-Version, Berlin
- Krajczmer, L. P. (1967): *Bionik*. Wiesbaden
- Küppers, U. (2001): Bionik – Innovationstransfer zwischen Biologie und Technik. In: In: Bundesministerium der Verteidigung (Hg.), *Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT): Analysen und Expertisen zur Wehrtechnischen Vorausschau*, Bonn
- Küppers, U. (2004): Bionik und Wirtschaftlichkeit. In: *Biologie Unserer Zeit* 34(5), S. 316–323
- Küppers, U., Tributsch, H. (2002): *Verpacktes Leben – Verpackte Technik*. Bionik der Verpackung, Weinheim
- Lu, Y. (2004): Significance and Progress of Bionics. In: *Journal of Bionics Engineering* 1, S. 1–3
- Luksch, H. (2005): Neurobionik – Prothetik, Biohybride und intelligente Algorithmen. In: *Rossmann/Tropea 2005*, S. 81–92
- Marko, H. (1972): Bionik oder die Nutzung biologischer Kenntnisse für den technischen Fortschritt. *ETZ-A* 93, S. 697–702
- Mattheck, C. (2003): Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik. Forschungszentrum Karlsruhe

- Med El (2005): Internetseiten der Firma MED-EL (Innsbruck, Österreich). <http://www.medel.com>, abgerufen am 06.09.2005
- Meier, R.H. III (2004): *Functional Restoration of Adults and Children with Upper Extremity Amputation*. New York
- Mercedes-Benz (2005): Konzeptfahrzeug Mercedes-Benz bionic car. Presseinformation vom 6. Juni 2005
- Michel, W. (2006): Herstellung superhydrophober Oberflächen mittels nanostrukturierter Partikelschichten. In: BLOKON 2006, S. 19-26
- MPG (Max-Planck-Gesellschaft) (2005): Perlmutter in höchster Auflösung. Pressemitteilung vom 30.09.2005
- Mundl, R. (CONTINENTAL A.G.), Stache, M. (TU Berlin, Bionik & Evolutionstechnik): Profilentwicklung von Fahrzeugreifen mit Evolutionsstrategie. In: 2. Fachtagung Bionik im Automobil, Ulm, 6. und 7. Dezember 2005
- Nachtigall, W. (1997): *Vorbild Natur – Bionik-Design für funktionelles Gestalten*. Berlin u. a.O.
- Nachtigall, W. (2002): *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin u. a.O.
- Nachtigall, W. (2003): *Bau-Bionik – Natur, Analogien, Technik*. Berlin u. a.O.
- Neinhuis, C., Barthlott, W. (1997): Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces. In: *Annals of Botany* 79, S. 667–677
- Neumann, D. (1993): *Technologieanalyse Bionik*. VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technik (Hg.), Düsseldorf
- NIDCR (National Institute of Dental and Craniofacial Research) (ed.) (2005): *Biomimetics and Tissue Engineering*. Verfügbar unter <http://www.nidcr.nih.gov>
- Odum, E.P. (1983): *Grundlagen der Ökologie*. Stuttgart/New York
- OECD (1989): *Biotechnology: Economic and Wider Impacts*. Paris
- Össur (2005): Internetseiten der Firma Össur Europe. <http://www.ossur.de>, abgerufen am 26.07.2005
- Ostwald, W. (1929): Der biologische Faktor in der Technik. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* 73, S. 1149–1150
- Otto Bock (2005): Internetseiten der Firma Otto Bock HealthCare GmbH. <http://www.ottobock.de/>, abgerufen am 04.08.2005
- Paun, Gh. (2004): *Bio-Inspired Computing Paradigms (Natural Computing)*. <http://upp.lami.univ-evry.fr/Documents/Paun/paun-biocom.pdf>
- Pfaff, D., Skiera, B. (2002): Ubiquitous Computing – Abgrenzung, Merkmale und Auswirkungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht. In: Britzelmaier, B., Geberl, S., Weinmann, S. (Hg.): *Der Mensch im Netz – Ubiquitous Computing*. Stuttgart u. a.O., S. 25–37
- Pflaum, H. (2002): *Innovationsmanagement und -marketing*, Skript zum Kurs 71388 im Rahmen des interdisziplinären Fernstudiums Umweltwissenschaften (infernium) der FernUniversität Hagen, Hagen/Oberhausen
- Phonak (2005): Internetseiten der Firma PHONAK GmbH. <http://www.phonak.de/ccde/savia.htm>, abgerufen am 27.07.2005
- Pier Hausbau (2005): Internetseiten der Firma P.I.E.R. Hausbau GmbH. <http://www.pier-solarhausbau.de/>, abgerufen am 04.10.2005
- Pompe, W. (2004): Biogene Keramik – Mit Genom- und Proteom-Forschung zu neuen Werkstoffen. In: *Bremer Universitätsgespräche: Neue Keramik – Aufbruch in Biosphäre und Nanowelt*. Bremen/Oldenburg
- Pompe, W., Mertig, M., Weis, K., Schönecker, A. (1999): Biomimetische Werkstoffsynthese. Ein Weg zu neuen Funktionskeramiken? In: Heinrich, J., Hermel, W., Ziegler, G., Riedel, H. (Hg.): *Werkstoffwoche '98*. Bd.7, Oberursel/Weinheim
- Rechberger, M. (2006): Persönliche Mitteilung an das TAB vom 15.03.2006
- Rechenberg, I. (1978): *Evolutionsstrategien*. In: Schneider, B., Ranft, U. (Hg.): *Simulationsmethoden in der Medizin und Biologie*. Berlin
- Rechenberg, I. (1994): *Evolutionsstrategie '94*. Stuttgart
- Rehabilitation Institute of Chicago (ed.) (o.J.): *The Bionic Arm Factsheet*. <http://www.ric.org/bionic/bionicfactsheet.pdf>
- Reiner, R. (1992): *Selbstorganisation: Anwendung eines biologischen Prinzips*. In: Nachtigall, W. (ed.): *BIONA-report 8*, Akad. Wiss. Lit., Mainz u. a.O., S. 13-26
- Rettweiler, M. (2006): Persönliche Mitteilung an das TAB vom 6. April 2006 (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen)
- Reuzel, R.P.B. (2001): *Health technology assessment and interactive evaluation: different perspectives*. Thesis, University of Nijmegen
- Rischka, K. (2006): Persönliche Mitteilung an das TAB, vom 28.03.2006
- Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (2002): *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and the Cognitive Science*. National Science Foundation, Arlington Virginia
- Rodotà, S., Capurro, R. (2005): *Ethische Aspekte der Verwendung von informations- und kommunikationstechnologischen (IKT)-Implantaten im menschlichen Körper*. Stellungnahme der Europäischen Gruppe für Ethik in Naturwissenschaften und neuen Technologien bei der Europäischen Kommission, Brüssel

- Ropohl, G. (1991): Technologische Aufklärung. Beiträge zur Technikphilosophie, Frankfurt
- Rossmann, T., Tropea, C. (Hg.) (2005): Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaften, Berlin/Heidelberg
- Sarikaya, M., Tamerler, C., Jen, A.K.Y., Shulten, K., Baneyx, F. (2003): Molecular biomimetics: nanotechnology through biology. In: Nature Materials 2 (9), S. 577–585
- Sauter, A. (2005): Grüne Gentechnik? – Folgenabschätzung der Agrobiotechnologie. In: Petermann, Th., Grunwald, A. (Hg.): Technikfolgen-Abschätzung für den Deutschen Bundestag; Das TAB – Erfahrungen und Perspektiven wissenschaftlicher Politikberatung. Berlin, S. 116–146
- Schäfer, St., Briegert, B., Menzel, St. (2005): Bionik im Bauwesen. In: Rossmann/Tropea 2005, S. 123–133
- Schlaich, M. (2004): Aktive und wandelbare Ingenieurbauten. In: Stahlbau 73/12, S. 1001–1009
- Schmidt, J. (2002a): Vom Leben zur Technik? Kultur- und wissenschaftsphilosophische Aspekte der Natur-Nachahmungsthese in der Bionik. In: Dialektik 2002/2, S. 129–143
- Schmidt, J. (2002b): Wissenschaftsphilosophische Perspektiven der Bionik. In: Thema Forschung 2/2002, S. 2–7
- Schmidt, J. (2004): Bionik und Interdisziplinarität. Wege zu einer bionischen Zirkulationstheorie der Interdisziplinarität. In: Rossmann/Tropea 2005, S. 219–245
- Schwefel, H.-P. (1981): Evolution und Optimierung. In: Jahresbericht der KFA Jülich
- Schwefel, H.-P. (1995): Evolution and Optimum Seeking. New York
- Seeman, N.C., Belcher, A.M. (2002): Emulating biology: Building nanostructures from the bottom up. In: PNAS 99, Suppl. 2, S. 6451–6455
- Seiler, P., Holtmannspötter, D., Albertshausen, U. (2004): Internationale Technologieprognosen im Vergleich. Zukünftige Technologien Consulting der VDI-Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf
- Shields, G., Gadre, A. (2002): Adult SNHL: Aids and Assistive Devices. Grand Rounds Presentation, University of Texas Medical Branch, Department of Otolaryngology. Galveston
- SIAS (Shanghai Institute for Advanced Studies der Chinese Academy of Sciences) (2003): Online-Ankündigung „4th Shanghai round table: Nature as Engineer and Teacher – Oct. 8-11, 2003“, <http://www.sias.ac.cn/p3-28.html>, abgerufen am 06.10.2005
- SKE (2005): Internetseiten der Firma S. K. Enterprise – Gesellschaft für bionische Lebensmittel mbH (Hamburg), <http://www.liplac.de/>, abgerufen am 07.09.2005
- Sörensen, M.H. (2004): Ambient Ecologies – Toward biomimetic IT. Ph.D. Dissertation, IT University of Copenhagen.
- Speck, T. (1999): Botanik. In: Lexikon der Biologie, Bd. 2, Heidelberg. <http://www.biologie.uni-freiburg.de/biomimetik/PDF/wissen.pdf>
- Speck, T. (2005): Inspiration für völlig neue Anwendungen. Interview mit Prof. Th. Speck vom 05.12.2005. <http://www.bio-pro.de/de/region/freiburg/magazin/01781/index.html>
- Speck, T., Fuchs, F., Luchsinger, R., Busch, S., Rüggeberg, M., Speck, O. (2006): Selbstreparierende Materialien nach biologischem Vorbild. Vortrag auf dem Bionik-Industriekongress 2006 „Innovationsmotor Natur“, 1. und 2. März 2006, Berlin
- Speck, T., Harder, T., Speck, O., Milwich, M., Stegmaier, T. (2005): Bionik: Die Natur als Innovationsquelle für Technische Textilien. In: Knecht, P. (Hg.): Technische Textilien. S. 83–101, Frankfurt
- Speck, O., Milwich, M., Harder, D., Speck, Th. (2005): Vom biologischen Vorbild zum bionischen Produkt: der „Technische Pflanzenhalm“. In: Museo 22, S. 96–103
- Stachowiak, H. (1970): Grundriß einer Planungstheorie. In: Kommunikation VI/1, S. 1–18
- Stieglitz, Th. (2005): Persönliche Mitteilung von Prof. Stieglitz, Telefonat vom 7.11.2005
- Stieglitz, Th., Rosahl, St. (2005): Neuro-elektrische Schnittstellen zum zentralen Nervensystem des Menschen. Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages im Rahmen der TAB-Vorstudie: Hirnforschung – Themenfeld 5: Medizinisch-technische Anwendungen der Hirnforschung – Neuroprothetik, Neurobionik, Neuroinformatik
- Strassmann, B. (2005): Kleben wie der Gecko. In: DIE ZEIT 49(2005), S. 41
- Süddeutsche Zeitung (2005): Bionik im Auto – von der Natur lernen. 11.07.2005. <http://motorcenter-content.sueddeutsche.de/automobil/artikel/636/56580/>, abgerufen am 02.08.2005
- Szentpétery, V. (2005): Schnittig wie ein Kofferrisch. In: Berliner Zeitung vom 20.10.2005, S. 15
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1999): Neue Materialien zur Energieeinsparung und zur Energieumwandlung. (Autoren: Fleischer, T., Oertel, D.), TAB-Arbeitsbericht Nr. 62, Bonn
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2003): Nanotechnologie. (Autoren: Paschen, H., Coenen, Chr., Grünwald, R., Oertel, D., Revermann, Chr.), TAB-Arbeitsbericht Nr. 92, Berlin
- Teschler-Nicola, M., Kneissel et al. (1998): A Recently Discovered Etruscan Dental Bridgework. In: Alt, K. W., Rösing, F. W., Teschler-Nicola, M. (1998): Dental Anthropology. Wien/New York, S. 57–68

- Toh, E.H., Luxford, W.M. (2002): Cochlear and brainstem implantation. In: *Otolaryngologic Clinics of North America* 35(2), S. 325–42
- TU Ilmenau (2005): Internetseiten der Technischen Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Biomechatronik. <http://www.tu-ilmenau.de/site/biomechatronik/index.php?id=542>, abgerufen am 04.08.2005
- UMSICHT (2005a): „Stets rattenscharfe Messer“ beim Ideenwettbewerb „Bionik – Innovationen aus der Natur“ des BMBF prämiert. http://www.umsicht.fhg.de/presse/bericht.php?titel=050308_bionikwettbewerb
- UMSICHT (2005b): Persönliche Mitteilung Herr Dirk Braun, Institut für Baukonstruktion (IBK2) der TU Stuttgart, vom 13.10.2005
- UMSICHT (2005c): Persönliche Mitteilung Herr Dr. Meisel, INGLAS Innovative Glassysteme GmbH & Co. KG, vom 13.10.2005
- UMSICHT (2005d): Persönliche Mitteilung von Dr. Andreas Gombert, Fraunhofer-Institut ISE, vom 12.10.2005
- Universität Bremen (2005): <http://www.ceramics.uni-bremen.de/neuigkeiten/neuigkeiten.php>
- Universität Bremen (2006a): Biomineralisation. <http://www.ceramics.uni-bremen.de/arbeitsgebiete/biomineralisation/biomineralisation.php>
- Universität Bremen (2006b): Perlmutter – Vorbild für nachhaltig zukunftsfähige Werkstoffe. <http://www.tecdesign.uni-bremen.de/FG10/dokumente/PerlmutterBericht.doc>, abgerufen am 06.03.2006
- Universität Kassel (2005a): Ausgangssituation für den Leichtbau. Elektronische Publikation des Fachgebiets für Leichtbau-Konstruktionen der Universität Kassel. http://www.uni-kassel.de/fb15/lbk/download/leichtbau/01_Ausgangssituation.pdf, abgerufen am 12.10.2005
- Universität Kassel (2005b): Entwicklungspotenzial der Werkstoffe im Automobilbau. Elektronische Publikation des Fachgebiets für Leichtbau-Konstruktionen der Universität Kassel. http://www.uni-kassel.de/fb15/lbk/download/leichtbau/07_Entwicklungspotentiale.pdf, abgerufen am 12.10.2005
- Universität Marburg (2005): NanoBionics III – from Molecules to Applications. <http://www.nanobionics3.de/>
- VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V.) (2005): Mikrosysteme in der Medizin. Studie zum Anwendungsfeld Neuroprothetik, Frankfurt
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.) (2006): Smart Materials und Adaptive Werkstoffe. http://www.vdi-jutec.de/index.php?seite=content_anzeigen&id=213&nav=schueler
- VDI-TZ (VDI-Technologiezentrum) (Hg.) (1993): Technologieanalyse Bionik. Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien. (Autor: Neumann, D.) Düsseldorf
- VDI-TZ (VDI-Technologiezentrum) (Hg.) (2002): Nanobiotechnologie I: Grundlagen und technische Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme. (Autoren: Wevers, M., Wechsler, D.) Zukünftige Technologien Nr. 38, Düsseldorf
- VDI-TZ (VDI-Technologiezentrum) (Hg.) (2004): Nanobiotechnologie II: Anwendungen in der Medizin und Pharmazie. (Autoren: Wagner, V., Wechsler, D.) Zukünftige Technologien Nr. 50, Düsseldorf
- Versweyveld, L. (2004): U.S. Department of Veterans Affairs to fund new centre for advanced limb-loss research. In: *Virtual Medical World*. <http://www.hoise.com/vmw/05/articles/vmw/LV-VM-01-05-15.html>, abgerufen am 16.12.2004
- von Gleich, A. (2001): Bionik – Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden
- von Weizsäcker, C., von Weizsäcker, E.U. (1984): Fehlerfreundlichkeit. In Kornwachs, K. (Hg.): *Offenheit – Zeitlichkeit – Komplexität. Zur Theorie der offenen Systeme*, Frankfurt/New York, S. 167–201
- Wagner, P. (2005): Nanobiotechnology. In: Greco, R., Prinz, F.B., Lane, R. (eds.): *Nanoscale Technology in Biological Systems*. Boca Raton
- Walter, P., Mokwa, W. (2005): Epiretinale Sehprothesen. In: *Der Ophthalmologe* 102(10), S. 933–940
- Weyer, J. (1997): Konturen einer netzwerktheoretischen Techniksoziologie. In: Weyer, J., Kirchner, U., Riedl, L., Schmidt, J.F.K.: *Technik, die Gesellschaft schafft. Soziale Netzwerke als Ort der Technikgenese*. S. 23–52, Berlin
- Wikipedia (2005): Lexikoneintrag zu „Six Million Dollar Man“. http://en.wikipedia.org/wiki/The-Six_Million_Dollar_Man, abgerufen am 12.09.2005
- WWF (World Wildlife Fund) (1995): BIONIK. Natur als Vorbild, München
- Zeng, F. (2004): Trends in Cochlear Implants. In: *Trends in Amplification* 8(1), S. 1–34
- Zhang, S. (2003): Fabrication of novel biomaterials through molecular self-assembly. In: *Nature Biotechnology* 21(10), S. 1171–1178
- Zscheck, E., Rauh, R. (2001): Intelligenter Leichtbau: Aluminium – ein Konkurrent und Partner. In: *HTM Zeitschrift für Werkstoffe – Wärmebehandlung – Fertigung* 3/2001, S. 191–199

Anhang

Der folgende Anhang soll eine Übersicht über die derzeit aktiven Akteure im Bereich Bionik geben (nach UMSICHT 2005). Er erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Bildungs- und Umwandlungsprinzipien von Stoffen, Materialien und Materialverbänden (Synthesen, Feststoffbildung, Selbstorganisation, Selbstheilung, Abbau etc.)		
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Werkstoffwissenschaften	Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Glas und Keramik); Bioengineered Ceramics und Biomedical Materials, Prof. Dr. rer. nat. Peter Greil	Bionische Materialsynthese
RWTH Aachen	Bionik-Zentrum Aachen, Prof. Dr. Hermann Wagner: AG Informations- und Neurobionik AG Verfahrensbionik AG Bewegungs- und Sensorbionik AG Strukturbionik AG Organisations- und Optimierungsbionik AG Konstruktionsbionik	Bündelung der Bionik-Aktivitäten an der RWTH Aachen: Biologie, Medizin, Maschinenbau, Informations- und Elektrotechnik
Stoffe (Chemikalien, Materialien), (funktionale) Mikrostrukturen, Ober- und Grenzflächen		
Botanischer Garten der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Plant Biomechanics Group Freiburg, Prof. Dr. Thomas Speck	Neue Materialien (Gradienten-, Naturfaserverbundstoffe); Smart Materials (selbstreparierend und selbstadaptiv)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Werkstoffwissenschaften	Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Glas und Keramik); Bioengineered Ceramics und Biomedical Materials, Prof. Dr. rer. nat. Peter Greil	Bionische Materialsynthese
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissenschaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	Neue Materialien; klebfreies Haften; Leichtbau;
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissenschaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	Antifouling; Strukturbionik
RWTH Aachen	Bionik-Zentrum Aachen, Prof. Dr. Hermann Wagner: AG Informations- und Neurobionik AG Verfahrensbionik AG Bewegungs- und Sensorbionik AG Strukturbionik AG Organisations- und Optimierungsbionik AG Konstruktionsbionik	Bündelung der Bionik-Aktivitäten an der RWTH Aachen: Biologie, Medizin, Maschinenbau, Informations- und Elektrotechnik

noch 1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
TU Dresden, Institut für Botanik	Lehrstuhl für Botanik, Prof. Dr. Christoph Neinhuis	Funktionen mikrostrukturierter cuticularer Oberflächen mit Schwerpunkt auf dem Lotus-Effekt
Universität Bonn, Nees Institut für Biodiversität der Pflanzen	Pflanzliche Grenzflächen: Strukturen, Funktion und technische Umsetzung, Prof. Dr. Wilhelm Barthlott	Selbstreinigende biologische und technische Oberflächen
Universität Potsdam, Institut für Biochemie und Biologie	Professur für Analytische Biochemie, Prof. Dr. Frieder W. Scheller	Analytische Biochemie, Biosensorik
Statische Konstruktionen (Leichtbau, Tragwerke, Flug-, Fahr- und Schwimmkörper)		
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Biologie III	AG Pflanzenbiomechanik, Prof. Dr. Hanns-Christof Spatz	Biomechanik und funktionelle Morphologie/Anatomie pflanzlicher Achsen; Evolution pflanzlicher Wuchsformen
Botanischer Garten der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Plant Biomechanics Group Freiburg, Prof. Dr. Thomas Speck	Leichtbaustrukturen
Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Institut für Geowissenschaften, Institut und Museum für Geologie und Paläontologie	Projektgruppe Funktionelle Morphologie und Biomimetik, Dr. Anita Roth-Nebelsick	Fluidbewegungen in und um Pflanzen für Anwendungen an technischen Textilien
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissenschaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	Leichtbau
RWTH Aachen	Bionik-Zentrum Aachen, Prof. Dr. Hermann Wagner: AG Informations- und Neurobionik AG Verfahrensbionik AG Bewegungs- und Sensorbionik AG Strukturbionik AG Organisations- und Optimierungsbionik AG Konstruktionsbionik	Bündelung der Bionik-Aktivitäten an der RWTH Aachen: Biologie, Medizin, Maschinenbau, Informations- und Elektrotechnik
Technische Universität Berlin	FG Bionik und Evolutionstechnik, Prof. Dr. Ingo Rechenberg	Windkonzentrator; Reibungsminde- rung in der Natur
TU Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt, Dr. Torsten Rossmann	Design von Wirbeltierstrukturen; Bionik im Bauwesen – Leichtbau

noch 1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Universität des Saarlandes	FB Biologie – Zoologie, AG Nachtigall, Prof. Dr. Werner Nachtigall	Gebäudelüftungssysteme nach Termitenbauvorbild; Reibungs- minderung in der Natur; Libellenflug
Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau	Institut für Thermische Energietechnik, Prof. Dr.-Ing. Martin Lawerenz	Formvariable Beschaufelungen in Turbomaschinen auf der Basis biolo- gischer Konzepte
Dynamische Systeme (Sensorik, Aktorik, Lokomotion, Robotik)		
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik	Lehrstuhl für Sensorik, Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch	Künstlicher Fledermauskopf; Entwicklung von Ultraschallsendern und Empfängern
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissen- schaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	Biosensorik; Energieminimierung (Hydrodynamik); Lokomotion/Transportprozesse; Robotik
RWTH Aachen	Bionik-Zentrum Aachen, Prof. Dr. Hermann Wagner: AG Informations- und Neurobionik AG Verfahrensbionik AG Bewegungs- und Sensorbionik AG Strukturbionik AG Organisations- und Optimierungsbionik AG Konstruktionsbionik	Bündelung der Bionik-Aktivitäten an der RWTH Aachen: Biologie, Medizin, Maschinenbau, Informations- und Elektrotechnik
Technische Universität Ilmenau, Institut für Mikrosystem- technik, Mechatronik u. Mechanik	FB Biomechatronik, Prof. Dr. Hartmut Witte	Bionik der Mikrosysteme; Bionisch inspirierte Robotik
Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen	Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Prof. Dr. Pfeiffer	Robotik und Laufmaschinen
TU Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt, Dr. Torsten Rossmann	Biodynamische Modellierung des Menschen; instationäre Aerodyna- mik des Schlagfluges; Modellierung und Simulation der Dynamik des Laufens; Prinzipien und Merkmale gelungener Bewegungen; Neuroakustik; Bionischer Roboterarm
Universität Bonn, Institut für Zoologie	Abteilung für Vergleichende Neurobiologie, Prof. Dr. H. Bleckmann	Bau und der Funktion der mechano- sensorischen Seitenlinie der Fische, technische Umsetzung von Reiz- aufnahme, Reizfilterung und Reiz- verarbeitung

noch 1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Universität des Saarlandes	FB Biologie – Zoologie, AG Nachtigall, Prof. Dr. Werner Nachtigall	Autonomes Laufen; Roboterarme mit elastischen Antrieben; Energiehaushalt und Kinematik des Starenfluges; Lokomotion von Fischen
Universität Dortmund	Lehrstuhl für Algorithm Engineering und Systemanalyse, Prof. Dr. Hans-Paul Schwefel	Neuronale Netze, Fuzzysysteme, evolutionäre Algorithmen
Prozesse (Geräte, Maschinen, Verfahren, Impuls-, Wärme- und Stofftransport)		
Technische Universität Berlin	FG Bionik und Evolutionstechnik, Prof. Dr. Ingo Rechenberg	Biosolare Wasserstoffproduktion
Universität des Saarlandes	FB Biologie – Zoologie, AG Nachtigall, Prof. Dr. Werner Nachtigall	Gebäudelüftungssysteme nach Termitenbauvorbild
Ästhetische Formen und Prinzipien		
TU Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt, Dr. Torsten Rossmann	Design von Wirbeltierstrukturen; Modellierung und Simulation der Dynamik des Laufens; Prinzipien und Merkmale gelungener Bewegungen
Hochschule Magdeburg-Stendal	FB Gestaltung/Industriedesign, Prof. Ulrich Wohlgemuth	Methodik für „Bionik-Design“
Datenübertragung und -verarbeitung (Optimierung mittels Evolutionsstrategien, Funkübertragung, Routing etc.)		
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissenschaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	Informationsbionik; Optimierungsverfahren
RWTH Aachen	Bionik-Zentrum Aachen, Prof. Dr. Hermann Wagner: AG Informations- und Neurobionik AG Verfahrensbionik AG Bewegungs- und Sensorbionik AG Strukturbionik AG Organisations- und Optimierungsbionik AG Konstruktionsbionik	Bündelung der Bionik-Aktivitäten an der RWTH Aachen: Biologie, Medizin, Maschinenbau, Informations- und Elektrotechnik,
Technische Universität Berlin	FG Bionik und Evolutionstechnik, Prof. Dr. Ingo Rechenberg	Systemoptimierung nach Evolutionsprinzipien; Prozesssteuerung durch neuronale Netze

noch 1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
TU Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt, Dr. Torsten Rossmann	Evolutionäre Optimierung; Entwicklung neuer Methoden für Evolutionäre Algorithmen; Numerische Simulation gekoppelter Problemstellungen
Universität Bielefeld, Fakultät für Biologie	AG Biologische Kybernetik, Prof. Dr. Holk Cruse	Sensorgetriebene und kognitive Systeme zur Robotersteuerung
Universität Karlsruhe (TH), Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren	Forschungsgruppe Effiziente Algorithmen, Prof. Dr. H. Schmeck	Evolution und Lernen, Organic Computing
Organisationsformen (Industrielle Ökologie, Management)		
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissen- schaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	Organisationsbionik
RWTH Aachen	Bionik-Zentrum Aachen, Prof. Dr. Hermann Wagner: AG Informations- und Neurobionik AG Verfahrensbionik AG Bewegungs- und Sensorbionik AG Strukturbionik AG Organisations- und Optimierungsbionik AG Konstruktionsbionik	Bündelung der Bionik-Aktivitäten an der RWTH Aachen: Biologie, Medizin, Maschi- nenbau, Informations- und Elektro- technik
Schnittstelle Mensch/Biologie-Maschine		
Technische Universität Ilmenau, Institut für Mikrosystem- technik, Mechatronik und Mechanik	FB Biomechatronik, Prof. Dr. Hartmut Witte	Bionik und Mechatronik für das Biomedical Engineering; Bionisch inspirierte Robotik
TU Darmstadt	Biotechnik-Zentrum Darmstadt, Dr. Torsten Rossmann	Bionischer Roboterarm
Informationstransfer		
Fraunhofer-Institut für Naturwissen- schaftlich-Technische Trendanalysen INT	Technologieanalysen und -vorausschau (TAV), Dr. Thomas Kretschmer	Technologieanalysen und -vorausschau
Hochschule Bremen, FB Schiffbau, Meerestechnik und Angewandte Naturwissen- schaften	Fachrichtung Bionik, Prof. Dr. Antonia Kesel	
Hochschule Magdeburg-Stendal	Hochschule Magdeburg-Stendal	Methodik für „Bionik-Design“

noch 1. Akteure nach Bionikforschungsthemen in Deutschland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Universität Bremen	FB Produktionstechnik, Fachgebiet 10: Technikgestaltung und Technologieentwicklung Prof. Dr. Armin von Gleich	Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Universität Münster, Institut für Didaktik	Prof. Bernd Hill	Didaktik und Methodik des Naturorientierten Lernens; Didaktik und Methodik der angewandten Bionik für den Ingenieurbereich
Universität Rostock, Institut für Ökotechnologie, Nieklitzer Ökologie- und Ökotechnologie- Stiftung	Zukunftszentrum Mensch- Natur-Technik-Wissenschaft, Prof. Dr. Berndt Heydemann	Zukunftszentrum Mensch – Natur – Technik – Wissenschaft

2. Unternehmen in Deutschland

Unternehmen	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet/Produkt
Adam Opel AG, Rüsselsheim		Optimierung von Motoraufhängun- gen nach bionischen Prinzipien
adidas-Salomon AG, Herzogenaurach		Jetconcept-Schwimmanzüge (Haifischhautprinzip)
Armstrong DLW AG, Bietigheim-Bissingen		Oberflächenbeschichtungen
Beiersdorf AG, Hamburg		Einsatz des Wirkstoffs Alpha-Flavon in Kosmetikprodukten
Bionic Solutions Peter Birke – Georg Rummel GbR, Saarbrücken	Georg Rummel, Peter Birke Spin-off aus der Universität des Saarlandes	Entwicklung von Produkten aus Naturprinzipien
Bionic Streamform Frank Wedekind		Prototypen- und Formenbau, bionische Modellierungen, Strömungsmechanik
Bionic Systems	Doris Fürst, Malte Haust	Bionik-Design
Bionicon – Inwall GmbH, Gmund am Tegernsee		Fahrräder (Rahmen- und Federungssystem nach dem Vorbild der Körpergeometrie von Gämsen)
Bionik Design, Burgrieden	Michael Post	Projektstudien, Industriedesign, Grafik

noch 2. Unternehmen in Deutschland

Unternehmen	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet/Produkt
BMW		Leichtbaufunktionsprofile für die Fahrwerksgestaltung; speziell geformte K 1200 S Motorradfelge; aerodynamisch optimiertes Wasserstofffahrzeug H2R
Chendo GmbH, Saalstadt		Trabekulär orientierte Endoprothesensysteme (bionisches Dämpfungssystem)
Continental AG, Hannover		Entwicklung von ContiPremiumContact und ContiSportContact 2-Reifen (Vorbilder Katzenpfote und Spinnennetz)
DaimlerChrysler, Stuttgart		Konzeptfahrzeug Mercedes Benz bionic car (Vorbild Kofferrisch)
Degussa AG, Düsseldorf	Creavis Technologies & Innovation; ProSurface, Trostberg	Aeroxide®, Tegotop® – selbstreinigende Oberflächenbeschichtungen (Anti-Fouling-Beschichtungen, Lackierungen)
Dr. Mirtsch GmbH Strukturierungstechnik, Teltow		Wölbstrukturierungen
Duravit AG, Hornberg		WonderGliss Fluid – schmutzabweisende Oberflächenbeschichtung
Erlus AG, Neufahrn		Erlus Lotus®, selbstreinigendes Tondach
Evologics GmbH, Berlin	Dr. Rudolf Bannasch	technische Umsetzung bionischer Prinzipien, Koordination BIOKON und TERRA BIONICA
FELUWA Pumpen GmbH, Mürlenbach	Heinz M. Nägel, GF	MULTISAFE Doppel-Schlauchmembran-Kolbenpumpe
Festo AG & Co. KG, Esslingen		pneumatische Muskeln
Franz Kaldewei GmbH & Co. KG, Ahlen		Kaldewei-Email® mit selbstreinigendem Perleffekt
Friedrich Graepel AG, Lönigen	Herr Wesselmann	Lochblechprodukte für Nutzfahrzeuge; bionische Schutzgitter für Actrosserien von Mercedes Benz
Ideal Standard, Bonn		Oberflächenbeschichtungen

noch 2. Unternehmen in Deutschland

Unternehmen	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet/Produkt
Keramag AG, Ratingen		KeraClean, KeraTec – Oberflächenbeschichtungen mit Lotuseffekt®
Koralle – Sanitärprodukte GmbH, Vlotho		GlasPlus, Glasveredelung
Miele & Cie. KG, Gütersloh	In Kooperation mit Prof. Dr. Frank Mirtsch, Technische Fachhochschule Berlin	Wäschetrommel mit wabenförmiger Wölbstruktur (Vorbilder: Seeschildkrötenpanzer, Facettenaugen von Insekten)
Nano Maxi, Wittibreit		Forschung und Vertrieb von nanobasierenden Oberflächenversiegelungen
Nano-X GmbH, Saarbrücken		Entwicklung und Produktion von neuen Werkstoffen der chemischen Nanotechnologie mit multifunktionalen Eigenschaften
Össur Europe, Pulheim (Stammsitz Island)		Bionische Prothesen
Otto Bock HealthCare GmbH, Duderstadt		Bionische Armprothese
Phonak GmbH, Fellbach (Hauptsitz Schweiz)		Hörgerätelinie Savia, Chiptechnologie, die Fähigkeiten von biologischen Systemen mit Digitaltechnologie umsetzt
P.I.E.R. Hausbau GmbH		BIONIK-Wohnpark
Siemens AG, München		Keramik mit der Mikrostruktur von Bäumen; Logistikprogramme nach dem Vorbild von Insektenstaaten; Ultraschalltechnologie in Analogie zu Fledermaussignalen
S.K. Enterprise – Gesellschaft für bionische Lebensmittel mbH, Hamburg		Bionische Lebensmittel
Sto AG, Stühlingen		Lotusan® Fassadenbeschichtungen
Trolining GmbH, Troisdorf		TROLINING® SelfCleaning System für Rohrleitungen
Velcro GmbH, Freiberg am Neckar (Stammsitz USA)		Klettverschlüsse
Villeroy & Boch, Mettlach		ceramicplus, activecare – Oberflächenbeschichtungen; schmutzabweisend, antibakteriell

noch 2. Unternehmen in Deutschland

Unternehmen	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet/Produkt
VitrA Ekom Sanitärmarketing GmbH, Kerpen		Oberflächenbeschichtungen
Witmed GmbH, Cottbus		Medizintechnische Beratungsleistungen

3. Technologiezentren in Deutschland

Technologiezentrum	Firma	Themengebiet
Cottbuser Technologie- und Entwicklungs-Centrum (CoTEC)	WITMED GmbH	Anwendungsgebiete der Bionik, Gewinnung und Auswertung bioelektrischer Signale; Medizinische Beratungs- und Serviceleistungen; Medizinische Praxisausstattung; Konzeptionelle Fach-, Investitions- und Rentabilitätsplanung; Übersetzungsleistungen Medizin/Medizintechnik

4. Netzwerke in Deutschland

Netzwerk	Partner	Ziel
BIOKON-Fachgruppe A1 „Medien, Internet, Datenbanken, Öffentlichkeitsarbeit, Presse“	TU-Berlin (Vorsitz), Uni Bonn (Botanik), HS Bremen, EvoLogics Berlin, TU Darmstadt, FZ Karlsruhe, Uni Saarbrücken	Mediale Öffentlichkeitsarbeit zum Thema Bionik
BIOKON-Fachgruppe A2 „Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik“	Uni Münster (Vorsitz), RWTH Aachen, TU Berlin, Architekturbüro Oligmüller Bochum, HS Bremen, TU Darmstadt, Uni Freiburg, TU Ilmenau, NICOL-Stiftung Nieklitz, HS Magdeburg-Stendal, Uni Saarbrücken	Didaktische Konzepte für Bionik in Schulen, Universitäten oder als Weiterbildung für Ingenieure

noch 4. Netzwerke in Deutschland

Netzwerk	Partner	Ziel
BIOKON-Fachgruppe A3 „Ausstellungen, Messen, Kongresse, Workshops, Tutorials, Exponate“	Uni Saarland (Vorsitz), TU Berlin, EvoLogics, HS Bremen, TU Darmstadt, Uni Freiburg, NICOL-Stiftung Nieklitz, ITV Denkendorf, Uni Bonn (Botanik)	Konzeption und Organisation von Messen, Kongressen, Workshops zur Bionik
BIOKON-Fachgruppe A4 „Industrielle Umsetzung“	Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen (Vorsitz), TU Darmstadt, EvoLogics, ITV Denkendorf, FH Magdeburg, Architekturbüro Oligmüller, Uni Bonn (Zoologie), FZ Karlsruhe, TU Ilmenau	Beratung zur industriellen Umsetzung von Bionik-Projekten
BIOKON-Fachgruppe B1 „Architektur, Design“	Architekturbüro Oligmüller (Vorsitz), Uni Saarbrücken, HS Magdeburg, TU Darmstadt, ITV Denkendorf	Begleitung von Bionik-Projekten und Beratung hinsichtlich Design, Öffentlichkeitsarbeit, Industriekontakte
BIOKON-Fachgruppe B2 „Leichtbau, Materialien“	FZ Karlsruhe (Vorsitz), Uni Freiburg, ITV Denkendorf, FZ Karlsruhe, TU Darmstadt BitZ, NICOL-Stiftung Nieklitz	Darstellung des Wissensstandes bionischer Leichtbauprinzipien und Materialien und fachlicher Austausch
BIOKON-Fachgruppe B3 „Oberflächen und Grenzflächen – Strukturen und Funktionen“	TU Dresden (Vorsitz), Uni Bonn, HS Bremen, TU Darmstadt, ITV Denkendorf, MPI Stuttgart, Uni Tübingen	kooperative Kompetenzzentrale für bionische Oberflächen und Grenzflächen
BIOKON-Fachgruppe B4 „Fluidynamik, Fliegen, Schwimmen, Robotik, DAMS“	Uni Bonn, Zoologie (Vorsitz), TU Darmstadt, RWTH Aachen, TU Berlin, EvoLogics, Uni Saarbrücken, Uni Tübingen, HS Bremen	Forschungsgruppe zur Ergänzung des physiologischen Kenntnisstands der Biologie mit dem Ziel des techni- schen Erkenntnisgewinns
BIOKON-Fachgruppe B5 „Biomechatronik, Biomedizin- technik, Mikrosystemtechnik, Aktuatorik, Robotik“	TU Ilmenau (Vorsitz), RWTH Aa- chen, TU Berlin, EvoLogics, TU Darmstadt, ITV Denkendorf	gemeinsame Projektbearbeitung im Bereich Robotik und Biomechatronik
BIOKON-Fachgruppe B6 „Sensorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation“	Uni Bonn, Zoologie (Vorsitz), RWTH Aachen, TU Berlin, EvoLogics, TU Darmstadt, TU Ilmenau	Identifizierung technischer Anwen- dungsfelder für bionische Sensoren und Sensorsysteme
BIOKON-Fachgruppe B7 „Optimierungsverfahren und -methoden	FZ-Karlsruhe (Vorsitz), Uni Freiburg, ITV Denkendorf, NICOL-Stiftung Nieklitz, TU Berlin, TU Darmstadt BitZ, TU Ilmenau	Darstellung des Wissensstandes und fachlicher Austausch der Mitglieder

noch 4. Netzwerke in Deutschland

Netzwerk	Partner	Ziel
BIOKON-Fachgruppe B8 „Bionik-Film“	k.A.	k.A.
Bionale – Lernen von der Natur e.V.	k.A.	Plattform für den Austausch unter den Disziplinen und der Förderung innovativer Ideen, die von der Natur inspiriert wurden
Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik	310 Mitglieder; Gründungsmitglieder: Prof. Dr. Werner Nachtigall (Uni Saarbrücken), Prof. Dr. I. Rechenberg (TU Berlin), U. Rohde (Schott Glaswerke AG), H. Zinner (MBB), Prof. Dr. H. Grünwald (Bayer AG), Prof. A. Weber (BASF)	Bekanntmachung der Bionik in einer breiteren Öffentlichkeit; regelmäßige Information über Neuigkeiten auf dem Gebiet der Bionik und der Technischen Biologie, Veranstaltung von Kongressen und Workshops
Kompetenznetz Biomimetik		Plattform für Wissenschaftler verschiedener Disziplinen und für Partner aus Industrie und Wirtschaft zur Ermöglichung gemeinsamer Entwicklungen von Produkten und Technologien; Schwerpunkte: neuartige technische Textilien, Smart Materials, Gradientenmaterialien

5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland

USA, Kanada

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill	Joanna Aizenberg, Ph.D.	Verfahren zur Herstellung von Mineralschichten mit hoch regulierbarem Kristallaufbau und Kerndichtigkeit; Analyse der Zusammensetzung des Schwamms <i>Euplectella aspergillum</i> als mögliches Modell für die Entwicklung zäher optischer Drähte
California Institute of Technology, Pasadena	Dickinson Lab, Michael Dickinson, Ph.D.	Aerodynamik und neuromuskuläre Kontrolle bei Fliegen als Grundlage für die Entwicklung eines Roboters mit dieser Technologie

noch 5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Carnegie Mellon University, Pittsburgh	NanoRobotics Lab, Metin Setti, Ph.D.	Klebmechanismus für temporäres Kleben, der (wie Käferfüße) durch erhöhte Konformität zur Oberfläche und Kapillarkraft wirkt; verschiedene Arten besonders steigfähiger Roboter
Case Western Reserve University, Cleveland	Biologically Inspired Robotics Laboratory, Robert Quinn, Ph.D.	Grillen und Kakerlaken als Vorbilder bei der Entwicklung absprungfähiger schnellerer autonomer Roboter mit höherer Steigfähigkeit
Cornell University, Ithaca, NY, USA	Department of Materials Science and Engineering, Emmanuel P. Giannelis, Walter R. Read, Professor of Engineering	Bionische Materialien und Nanobiotechnologie
Harvard University, Boston	BioRobotics Laboratory, Robert Howe, Ph.D.	Roboter zur biomedizinischen Anwendung; Teilnahme am Stanford Biomimetic Robotics Projekt
Johns Hopkins University, Baltimore	Department of Mechanical Engineering, Laboratory for Active Materials and Biomimetics (LAMB), Kalia Ramesh, Ph.D.	Charakterisierung des Verhaltens von „compliant active materials“ (bes. von künstlichen Muskeln)
Lewis and Clark College, Portland, Oregon	Autumn Lab, Kellar Autumn, Ph.D.	Biomechanik, Verklebung, Fortbewegung des Geckos, Anwendung in der Entwicklung selbstreinigender Klebstoffe
Massachusetts Institute of Technology (Institute for Soldier Nanotechnologies), Cambridge	Hammond Lab, Paula T. Hammond, Ph.D.	Entwicklung eines nanostrukturierten Stoffs nach dem Vorbild der Spinnenseide zur Verwendung in kugelsicherer Kleidung etc.
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge	Biomolecular Materials Laboratory, Angela Belcher, Ph.D.	Selbsterstellung von elektrischen und magnetischen Materialien im Nanobereich, Entwicklung organisch-anorganischer Composite
Nekton Research LLC, Durham		Bionisch geformte Unterwasserroboter zu Überwachungszwecken
Northeastern University, Boston	Biomimetic Underwater Robot Program, John Ayers, Ph.D.	Selbständige Unterwasserroboter mit Aktuatoren und Sensoren zur Muskelsteuerung, Selbststeuerung (künstliche Nervensysteme)
Northwestern University, Evanston, Illinois	Messersmith Research Group, Phillip Messersmith, Ph.D.	Klebstoff nach Vorbild von Muschelproteinen; Anwendung für Anti-Fouling-Zwecke

noch 5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Penn State University, Pennsylvania	George Lesieutre, Ph.D.	Strukturdynamik von Fluggeräten, bes. von deren elastischen Teilen; Bau eines Flugzeugs mit Flügeln, die ihre Form während des Fluges ändern können
Princeton University	Ceramic Materials Laboratory, Ilhan Aksay, Ph.D.	Methoden zur (Selbst-)Herstellung selbstheilender Materialien im Nanobereich; Herstellung organisch- anorganischer Composite
Stanford University	Biomimetic Robotics Project, Mark Kutkosky, Ph.D.	Entwicklung schnellerer, robuster, insektenähnlicher Roboter (in Zusammenarbeit mit Harvard, Johns Hopkins und U.C. Berkeley)
University of California, Berkeley	Poly-PEDAL Laboratory, Robert Full, Ph.D.	künstliche Geckofußhaare, bes. für steigfähige Roboter
University of California, San Diego	Meyers Group, Marc Meyers, Ph.D.	untersucht und modelliert die Struktur, das Wachstum und die mechanischen Eigenschaften der Schalen von <i>Haliotis</i> sp. (Meerohren) und der Schnäbel von Ramphastidae sp. (Tukane)
University of California, San Diego	Kenneth Vecchio, Ph.D.	Entwicklung biomimetischer mehr- schichtiger Materialien aus Wolfram, Titan etc. („metallic-intermetallic laminates“); Anwendung als strukturelles bzw. schussicheres Material
University of California, Santa Barbara	Waite Research Group, Herbert Waite, Ph.D.	wasserunempfindlicher Klebstoff nach Vorbild von Muschelproteinen; Anwendung für Anti-Fouling- Zwecke
University of California, Santa Barbara	Daniel Morse, Ph.D.	Biologischer Mechanismus (Genetik) der Biomineralisation in Meerestieren und die Anwendung dieser Technologie auf die Mikro- und Optoelektronik
University of Florida, Gainesville	Laurie Gower, Ph.D.	Biomimetische Synthese von nanostrukturierten Verbundstoffen (Biokeramiken usw.)
University of Massachusetts, Amherst	Gregory Tew, Ph.D.	Entwicklung chemischer Strukturen mit abgetrennten polaren und nicht polaren Bereichen, die die Eigen- schaften komplexer biologischer Moleküle besitzen

noch 5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
University of Michigan, Ann Arbor	Kotov Research Group, Nicholas Kotov, Ph.D.	Verfahren zur Herstellung von künstlichem Perlmutter und biokompatibler Nanostrukturen
University of New Mexico, Albuquerque	Artificial Muscle Research Institute (AMRI), Mohsen Shahinpoor, Ph.D.,	künstliche Muskeln, die durch elektrische und chemische Signale kontrolliert werden; Einsatz in schwimmenden und laufenden Robotern; Erforschung biomedizinischer Einsatzmöglichkeit dieser Muskeln (z. B. in Kunstherzen)
University of Washington	Biomimetic and NanoComposite Materials Research Group, Mehmet Sarikaya, Ph.D.	Untersuchung des Aufbaumechanismus silikatischer Biomaterialien: mögliche Anwendung in der Herstellung von Keramiken bei Raumtemperatur
University of Toronto, Kanada	Biomimetics for Innovation and Design Laboratory, L.H. Shu, Ph.D.	biomimetisches Design für die Optimierung von Verpackungen und Herstellung von leicht reparierbaren Maschinenteilen, Systematisierung des Prozesses biomimetischen Designs
University of British Columbia, Vancouver Kanada	Rizhi Wang, Ph.D.	Untersuchung der Eigenschaften von natürlichen Materialien (z. B. Zähnen, Perlmutter), um bessere Implantate zu entwickeln, die das Wachstum neuer Gewebe erlauben

Großbritannien

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
University of Bath	The Centre for Biomimetic and Natural Technologies, Julian Vincent, Ph.D.	Entwicklung eines besonders atmungsaktiven Stoffs, dessen Oberfläche wie ein Kienapfel auf Luftfeuchtigkeit reagiert; Verbesserung der TRIZ-Methode; Entwicklung springender Roboter; Imitation des Verhaltens staatenbildender Insekten durch Roboter
University of Birmingham	School of Biosciences, Organismal and Environmental Biology, Prof. J.A. Callow	Antibiofouling-Oberflächen; Koordinator des EU-Projektes AMBIO (Advanced Nanostructured Surfaces for the Control of Biofouling)

noch 5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
University of Bristol	Fiona Meldrum, Ph.D.	Verfahren zur Biomineralisation; Untersuchung der Kristallbildung in Seeigeln etc.
University of Cambridge	Structures Group Simon Guest, Ph.D.	Entwicklung von Modellen für biometrische Strukturen und „deployable structures“ nach biologischem Vorbild
University of Reading	George Jeronimidis, Ph.D.	Untersuchung der Eigenschaften von Knochen, um stoßfestere Materialien zu entwickeln; Entwicklung eines künstlichen, mit Gel gefüllten Muskels nach dem Fortbewegungssystem des Regenwurmes; Teilnahme am Cicada Projekt: Untersuchung der Sensoren in der Haut von Insekten (bes. Grillen)
University of Manchester	Centre for Mesoscience and Nanotechnology, Andre Geim, Ph.D.	Entwicklung eines Klebebands mit den selbstreinigenden Eigenschaften von Geckofüßen

Japan, China

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Nagoya University, Japan	Nature COE, Shigeo Asai	Materialforschung; Strukturbionik
Doshisha University, Japan	Biomimetics Research Center	Bionische Chemie; Bionische Mechanik; Bioinformation
National Institute for Advanced Interdisciplinary Research (NAIR), Tsukuba, Japan	Bionic Design	Biomaterialien; Biomolekulare Mikromaschine
Kyushu University, Japan	Graduate School of Engineering, Department of Chemistry and Biochemistry	Biomimetics
University of Tokyo, Japan	Department of Materials Engineering, Prof. Ryo Yoshida	Intelligente Polymergele und ihre Anwendung auf biomedizinischem und biomimetischem Gebiet
University of Tsinghua, China	Department of Materials Science, Key Laboratory for Advanced Materials of Ministry of Education, Prof. Dr. Li H.D.	Biomimetics
Chinese Academy of Sciences	Institute of Chemistry, Laboratory of Organic Solids, Prof. Jiang Lei, Dr. Feng Lin	Nanotube-Beschichtungen nach dem Vorbild des Geckofußes

noch 5. Hochschulen und FuE-Einrichtungen im Ausland

Europa außer UK

FuE-Einrichtung	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Universität Uppsala, Schweden	Molekularbionik Stenbjörn Styring	Molekularbionik
Universität Uppsala, Schweden	Department of Surface Biotechnology with the Center for Surface Biotechnology Prof. Karin Caldwell	Bionik
Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm, Schweden	CoE Biomimetics Prof. Anders Lansner	Bionik für mikrosystem-basierte künstliche Olfaktion
EMPA Materials Science & Technology, Dübendorf, St. Gallen, Thun, Schweiz	Gruppe Holzwissenschaft/ Biomimetik	Keramisierung von Holzstrukturen durch Silica-Sol und gasförmiges Silicium zu anisotrop porösen Körpern Infiltration der keramisierten Holzstrukturen mit Metallschmelzen (Al) zu dichten Kompositwerkstoffen
ESA, European Space Agency, Paris	ACT Advanced Concepts Team, Noordwijk, NL, ACT Biomimetics, Carlo Menon	Künstliche Muskeln; Robotik
Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne, Schweiz	Institute of Chemical Sciences and Engineering, Laboratory of Photonics and Interfaces, Prof. Michael Grätzel	Solarzelle nach dem Prinzip der Photosynthese
National Hellenic Research Foundation	Institute of Biological Research and Biotechnology, Industrial Biotechnology	Bionik/Nanobiotechnologie
Universität für Bodenkultur Wien, Department für Biotechnologie	Zentrum für NanoBiotechnologie (ZNB); O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Hermann Katinger	Molekularbiotechnologie und biomimetische Membranen
Universite de Tours – CNRS, Frankreich	Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte – IRBI	Teilnahme am Projekt CICADA
University of Twente, Niederlande	Transducers Science and Technology Group (TST)	Teilnahme am Projekt CICADA
Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, Frankreich	Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes	Projekt Robea – An Interdisciplinary National Program in Robotics; Projekt Robocoq – Conception et réalisation d'un robot ornithoïde doté d'une vision stabilisée
Russian Academy of Sciences	Department of Biochemical Physics, Prof. Alexander E. Shilov	Design biomimetischer Systeme

6. Unternehmen im Ausland

Unternehmen	Arbeitsgruppe und Kopf der AG	Themengebiet
Advanced Bionics, Sylmar, CA, USA		„bionic ear“; Cochlear-Implantate (implantierbare Hörhilfen)
Arena International, Fribourg, Schweiz		Powerskin®-Schwimmanzüge (Delfinhautprinzip)
Cochlear Headquarters, Lane Cove, Australien		Cochlear-Implantate (implantierbare Hörhilfen)
FASTECH Europe AG, Pratteln, Schweiz		Klettbänder
Ferro Corporation, Cleveland, Ohio, USA		Architekturgläser mit Lotus-Effekt
MED-EL Worldwide Headquarters, Innsbruck, Österreich		Cochlear-Implantate (implantierbare Hörhilfen)
Nexia Biotechnologies, Vaudreuil- Dorion, Kanada		Spinnverfahren für künstliche Spinnenseide (BioSteel), die in der Mikroelektronik und Biomedizin eingesetzt wird
Nike, Beaverton, Oregon, USA		Swift Suit-Schwimmanzüge (Haifischhautprinzip)
Össur Europe, Pulheim (Stammsitz Island)		Bionische Prothesen
Phonak Gruppe, Stefa, Schweiz		Hörgerätelinie Savia, Chiptechnolo- gie, die Fähigkeiten von biologischen Systemen mit Digitaltechnologie umsetzt
Prospective concepts ag, Glattbrugg, Schweiz		Auftragsentwicklung bionischer Produkte; Schwerpunkte: textilpneu- matische und adaptive Strukturen; 3D-Textilien bzw. Verfahren; Beschleunigungs- und Druckanzüge für Piloten; Pneumatische Tragstrukturen; Modulare Messtech- nik, Sensoren und Elektronik
Speedo International, Nottingham, UK		Fastskin-Schwimmanzüge (Haifischhautprinzip)
TYR Sport, Inc., Huntington Beach, CA, USA	Kooperation mit Center for Research and Education in Special Environ- ments (CRESE), Buffalo, New York	AquaShift-Schwimmanzüge (Haifischhautprinzip)

7. Netzwerke im Ausland

Netzwerk	Partner	Ziel
BIONIS Network for Industrial Sustainability – University of Reading		Vermarktung bionischer Lösungsansätze, Koordinierung und Förderung wissenschaftlichen Austausches und des Austausches zwischen Forschung, Industrie und Finanzsektor; Auslotung akademisch-industrieller Kooperationen, Öffentlichkeitsarbeit
Biomimetics New Zealand Inc.		Unterstützung interdisziplinärer bionischer Forschung
Biomimikry Guild, Helena, MI, USA		Beratung von Gemeinden und Firmen; Forschung, Workshops

8. Universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, die im Bereich Materialien und Werkstoffe tätig sind

Nachfolgend werden relevante Universitäten und Forschungsinstitute innerhalb Deutschlands und deren Forschungsansätze in der bionikbasierten Materialwissenschaft aufgeführt (Umsicht 2005):

Prof. Dr. Eduard Arzt*, Max Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart: Die Wurzeln des Max-Planck-Instituts für Metallforschung reichen zurück nach Berlin-Neubabelsberg, wo es 1921 als Kaiser-Wilhelm-Institut gegründet wurde. Seitdem hat sich das Institut in den mehr als 80 Jahren seines Bestehens zu einer der weltweit führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Werkstoffe entwickelt. Forschungsziel der Abteilung Arzt ist es, das mechanische Verhalten von Materialien im Mikrometer- und Submikrometerbereich zu verstehen. Dazu werden auch biologische Systeme untersucht: Anatomie von Pflanzen, mechanische Eigenschaften von Pflanzenoberflächen und Pflanzenmaterialien, Biologische Systeme, Oberflächenstrukturen, Reibung und Adhäsion.

Prof. Dr. Wilhelm Barthlott*, Universität Bonn, Nees Institut für Biodiversität der Pflanzen: Der Lotus-Effect®, entdeckt durch Prof. Dr. Wilhelm Barthlott, hat sich allgemein als Demonstrationsprojekt zur Übertragung biologischer Oberflächeneffekte auf technische Oberflächen etabliert. Für seine von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungen wurde Prof. Barthlott 1997 mit dem Karl Heinz Beckurts-Preis ausgezeichnet. 1998 war Prof. Barthlott für den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten nominiert. 1999 erhielt er den Philip Morris Forschungspreis, sowie am 31. Oktober in Weimar den „Deutschen Umweltpreis 1999“. Strukturen, Funktion und technische Umsetzung pflanzlicher Grenzflächen ist ein Forschungsschwerpunkt des Nees Instituts.

Prof. Stefan Behling, Technische Universität Stuttgart, Institut für Baukonstruktion, Lehrstuhl 2: Bionisch inspirierte Gebäudehüllen unter Einsatz neuer Materialien bilden ein Forschungsthema des Lehrstuhls.

Jürgen Bertling*, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, GF Spezialwerkstoffe: Schwerpunkt der werkstofflichen Arbeiten liegt im Bereich selbstheilender Polymerwerkstoffe und selbstschärfender Schneidstoffe nach dem Vorbild diverser Säugetierzähne für die Polymerzerkleinerung. Weitere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Mineralisation an polymeren Template-Strukturen.

Prof. Dr. Armin von Gleich*, Universität Bremen, FB Produktionstechnik, FG Technikgestaltung und Technologieentwicklung: Gemeinsam mit dem Fachbereich Physik der Universität Bremen wurden 2004 Untersuchungen zur Entwicklung keramischer Werkstoffe nach dem Vorbild von Perlmutter durchgeführt.

Prof. Dr. Peter Greil, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Werkstoffwissenschaften, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften (Glas und Keramik): Biomimetrische Materialsynthese in Form von „Biotemplating“ zählt zu den Forschungsschwerpunkten des Lehrstuhls.

Prof. Dr. Antonia Kesel*, Hochschule Bremen, Studiengang Bionik: Materialtechnische Forschungsschwerpunkte der Fachgruppe um Professorin Kesel sind biologische Antifouling- und Klebsysteme.

Prof. Dr. Christoph Neinhuis*, Technische Universität Dresden, Institut für Botanik: Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Christoph Neinhuis hat jahrelange Erfahrung mit pflanzlichen Grenzflächen, der Charakterisierung von Grenzflächenphänomenen und biologischen Verbundmaterialien. Forschung und Entwicklung marktreifer technischer Oberflächen bilden die Arbeitsschwerpunkte der Arbeitsgruppe.

Prof. Dr. Claus Mattheck*, Forschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Biomechanik: Bionik-Schwerpunkte der Abteilung Biomechanik sind die zur Bauteiloptimierung nach Vorbild des Knochenwachstums entwickelte Soft-Kill-Option-Methode und die Optimierung von Maschinenbauteilen (Computer Aided Optimization) nach dem Vorbild der Bäume. Prof. Claus Mattheck wurde für diese Arbeiten 2003 mit dem Umweltpreis der DBU ausgezeichnet.

Prof. Dr. Ingo Rechenberg*, Technische Universität Berlin, FG Bionik und Evolutionstechnik: Bionik hat an der Technischen Universität Berlin eine lange Tradition. Aufbauend auf den Arbeiten von Heinrich Hertel in den 1960er Jahren wurde 1972 der Lehrstuhl für Bionik und Evolutionstechnik speziell für Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg eingerichtet. Einen werkstofflichen Forschungsschwerpunkt bilden tribologische Effekte biologischer Materialien bzw. Oberflächen („Reibungsminderung in der Natur“).

Dr. Torsten Rossmann*, Technische Universität Darmstadt, Biotechnik Zentrum Darmstadt (BitZ): Das Biotechnik-Zentrum Darmstadt (BitZ) unter Leitung von Dr. Torsten Rossmann bildet den strukturellen Rahmen des Forschungsschwerpunkts Biotechnik an der TU Darmstadt und koordiniert die Zusammenarbeit von 30 Hochschulprofessoren aus den Disziplinen Bionik, Biomedizintechnik, Biomechanik und Strukturoptimierung. Werkstoffliche Ansätze ergeben sich aus den Forschungsthemen Biomedizintechnik und Biomaterialien, adaptive Systeme und Strukturfor-

Dr. Anita Roth-Nebelsick*, **, Universität Tübingen, Institut für Geowissenschaften, Projektgruppe Funktionelle Morphologie und Biomimetik: Die Projektgruppe Funktionelle Morphologie und Biomimetik am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen befasst sich mit allen Aspekten von Fluidbewegungen in und um Pflanzen sowie mit bionischen Anwendungen dieser biophysikalischen Prozesse. Betrachtet werden insbesondere Massenfluss, Wärmetransport, Diffusion und Grenzflächeneffekte. Das Forschungsziel der Projektgruppe besteht darin, eine umfassende und integrative Analyse der biologischen Formfunktionsbeziehungen zu erhalten.

Prof. Dr. Thomas Speck*, **, Botanischer Garten der Universität Freiburg: Die wissenschaftliche Arbeitsgruppe des Gartens „Plant Biomechanics Group“ beschäftigt sich mit der Biomechanik fossiler und rezenter Pflanzen. Als Mitglied des Kompetenznetzes „Pflanzen als Ideengeber für die Entwicklung biomimetischer Materialien und Technologien“ der Universität Freiburg werden die werkstofflichen und konstruktiven Erkenntnisse in industrielle Anwendungen übertragen.

Dr. Thomas Stegmaier*, **, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf: Die Forschungsgruppe Bionik ist ein aktueller Schwerpunkt innerhalb der Forschungsbereiche am ITV Denkendorf, dem größten Textilforschungszentrum Deutschlands. Die Aufgabe der Forschungsgruppe liegt in der Umsetzung von biologischen Erkenntnissen in neue faserbasierte Werkstoffe bzw. Bauteile.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF: Hauptgegenstand der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF ist die optische Systemtechnik mit dem Ziel der immer besseren Kontrolle von Licht. Prof. Tünnermann erhielt 2005 den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis für die technische Nutzung biologischer Mikro- und Nanostrukturen in der Laserphysik und Optik.

* Mitglied im Kompetenznetz BOKON e.V. (Stand Oktober 2005)

** Mitglied im Kompetenznetz BIOMIMETIK (Stand Oktober 2005)

	Seite
9. Tabellenverzeichnis	
Tab. 1 Deutschsprachige Definitionen der Bionik	13
Tab. 2 Von der Biologie zur Technik am Beispiel der Schwarmintelligenz	16
Tab. 3 Patentrecherche depatisnet	24
Tab. 4 Biokon-Fachgruppen	25
Tab. 5 Förderprogramme zu Neuen Materialien	33
Tab. 6 Analogien technischer und molekularer Maschinen	48
Tab. 7 Akteure im industriellen Bereich (Auswahl)	52
10. Abbildungsverzeichnis	
Abb. 1 Portfolio bionischer Anwendungsfelder heute	22
Abb. 2 Publikationen ausschließlich aus Universitäten mit bionischem Bezug (scifinder-Datenbank)	27
Abb. 3 Zeitliche Entwicklung der Publikationshäufigkeit zu bionischen/biomimetischen Materialien	32
Abb. 4 Arbeitsweise von Nanobionik und Nanobiotechnologie	44