

# **Methoden und Werkzeuge für den Wissenstransfer in der Bionik**

Der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin / Doktoringenieur**  
**(Dr.-Ing.)**

am 1. Juni 2007 vorgelegte Dissertation

von Dipl.-Ing. André Jordan



## Abstrakt

Die Entwicklung innovativer Produkte ist in der Regel mit einem fachübergreifenden Transfer von Wissen verbunden. Dieser Wissenstransfer erfolgt bislang meist zufällig und wenig systematisch. Zukünftig wird er jedoch – bedingt durch den Zwang zu Innovationen und der kontinuierlich betriebenen Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses – an Bedeutung gewinnen.

In dieser Arbeit werden Fragestellungen des fachübergreifenden Wissenstransfers aus Sicht der Produktentwicklung beleuchtet. Im Vordergrund stehen dabei die Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung des bionischen Arbeitens. Die Bionik ist eine transdisziplinär angelegte Wissenschaftsdisziplin, die sich mit der Erforschung biologischer Systeme sowie mit der Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in technische Produkte und Verfahren befasst. Mit Hilfe der Bionik wurden bereits eine Reihe innovativer Lösungen für technische Problemstellungen generiert. Dennoch ist festzustellen, dass sich das bionische Arbeiten im Rahmen der Produktentwicklung bislang kaum etablieren konnte. Zwar existieren Modelle, die die Arbeitsweise in der Bionik beschreiben, doch werden diese in der Praxis kaum gelebt. Ähnliches gilt für die Werkzeuge und Methoden, die zur Unterstützung bionisch arbeitender Personen entwickelt wurden.

Den Anstoß für die Entwicklung eines bionischen Produktes bilden Analogien. In dieser Arbeit wird daher untersucht, welche Bedeutung Analogien für die Produktentwicklung haben und wie die Bildung zweckmäßiger Analogien unterstützt werden kann. Dabei wird deutlich, dass in Natur und Technik ein enger Zusammenhang zwischen Funktionen, Strukturen und Materialien besteht. Eine analoge Gegenüberstellung sollte daher alle möglichen Aspekte der beteiligten Analoga berücksichtigen und ganzheitlich ihre Unterschiede und Gemeinsamkeiten herausstellen. Der Prozess zum Aufbau eines ganzheitlichen Analogiebildes wird dieser Arbeit durch das Bionische Analogiemodell beschrieben.

Für den Aufbau eines solchen Analogiemodells ist in der Regel Expertenwissen notwendig. Die Kommunikation zwischen Fachexperten und Produktentwicklern wird daher in dieser Arbeit ebenfalls thematisiert. Neben einem Kommunikationsmodell, das den Wissenstransfer in verschiedenen Dimensionen beschreibt, wird mit dem Triadengespräch ein Ansatz vorgestellt, mit dem sich die Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren effizienter gestalten lässt.

Die bestehenden Ansätze zur Unterstützung des bionischen Arbeitens werden in dieser Arbeit gleichfalls dargestellt und diskutiert. Davon ausgehend wird das Konzept für ein Unterstützungssystem für die Bionik erarbeitet. Hierbei handelt es sich um ein Semantisches Wiki, das die bereits existierenden Ansätze zusammenführt. Als Werkzeug für Recherche unterstützt es den Produktentwickler beim Aufbau des bionischen Analogiemodells und bei der Suche nach Experten, an die er sich bei offenen Fragen und konkreten Problemstellungen wenden kann.

*Und die Frage, die sich ein Ingenieur stellen muss, ist: Gibt es neben meinem Wissen noch andere Pfade, die mich schneller an das Ziel führen?*

*ARNO JAMBOR*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Forschungsmethodik.....	5
1.3 Struktur der Arbeit.....	7
<b>2 Bionik im Überblick.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Bionik im Schrifttum.....</b>	<b>10</b>
2.1.1 Begriffsklärung und Grundverständnis.....	10
2.1.2 Teilgebiete der Bionik.....	12
2.1.3 Zusammenfassung.....	16
<b>2.2 Beispiele bionischer Produkte.....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Beispiel: Lotus-Effekt.....	17
2.2.2 Beispiel: Haifischhaut.....	19
2.2.3 Beispiel: Unterwasser-Modem.....	20
2.2.4 Beispiel: Anti-G-Anzug.....	21
<b>2.3 Bionik in der Praxis.....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Vorgehensweise.....	23
2.3.2 Biologische Grundlagenforschung.....	24
2.3.3 Bionisches Arbeiten.....	25
2.3.4 Technische Umsetzung.....	27
<b>2.4 Zusammenfassung.....</b>	<b>28</b>
<b>3 Produktentwicklung im Überblick.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Produktentwicklungsmethodik.....</b>	<b>33</b>
3.1.1 VDI-Richtlinie 2221.....	33
3.1.2 Alternative Beschreibungen der Vorgehensweise.....	34
3.1.3 Weitere Aspekte der Produktentwicklung.....	36
<b>3.2 Strategien, Methoden, Werkzeuge und Hilfsmittel.....</b>	<b>39</b>
3.2.1 Strategien.....	39
3.2.2 Sachmethoden.....	40
3.2.3 Organisationsmethoden.....	41
3.2.4 Werkzeuge und Hilfsmittel.....	42
<b>3.3 Konstruktionsarten.....</b>	<b>44</b>
3.3.1 Neukonstruktion.....	44
3.3.2 Anpassungskonstruktion.....	45
3.3.3 Variantenkonstruktion.....	46
3.3.4 Zusammenfassung.....	47
<b>3.4 Entwicklung technischer Systeme.....</b>	<b>47</b>
3.4.1 Evolution technischer Systeme.....	48
3.4.2 Entwicklungstrends technischer Systeme.....	50
<b>3.5 Zusammenfassung.....</b>	<b>51</b>

---

<b>4 Lösungsfindung.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Lösungsfindung in der Praxis.....</b>	<b>53</b>
4.1.1 IPE-Projekt: Schleifgerät.....	54
4.1.2 IPE-Projekt: Carving-Hilfe.....	55
4.1.3 IPE-Projekt: Ampel-Informationen-System.....	56
4.1.4 Ideenfindung durch Wettbewerbsanalyse.....	57
4.1.5 Ideenfindung durch nichttechnische Assoziation.....	59
<b>4.2 Exkurs in die Analogielehre.....</b>	<b>60</b>
4.2.1 Analogien aus philosophischer Sicht.....	61
4.2.2 Analogien aus psychologischer Sicht.....	63
4.2.3 Analogiearten.....	64
<b>4.3 Analogiebildung in der Produktentwicklung.....</b>	<b>65</b>
4.3.1 Analogien und Kreativitätstechniken.....	65
4.3.2 Analogien und das Konzept der Wiederverwendung.....	68
4.3.3 Lösungsfindung und das Werkzeug „Bionik“.....	71
<b>4.4 Thesen.....</b>	<b>74</b>
<b>5 Modelle für das bionische Arbeiten.....</b>	<b>79</b>
<b>5.1 Übertragungsmodelle für die Bionik.....</b>	<b>80</b>
5.1.1 Modell von Hill.....	80
5.1.2 Modell von Küppers.....	81
5.1.3 SFT-Methode nach Rummel.....	84
5.1.4 Bionisches Vorgehensmodell nach Gramann.....	86
5.1.5 Ilmenauer Bionic Algorithm.....	88
5.1.6 Zusammenfassung und Kritik.....	90
<b>5.2 Bionisches Analogiemodell.....</b>	<b>92</b>
5.2.1 Vorbetrachtungen.....	92
5.2.2 Analogiebildung als Mapping-Prozess.....	94
5.2.3 Verallgemeinerung des Analogiemodells.....	97
5.2.4 Diskussion des Analogiemodells.....	99
<b>5.3 Analogiebildung als Kommunikationsprozess.....</b>	<b>101</b>
5.3.1 Vorbetrachtungen.....	101
5.3.2 Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren.....	104
5.3.3 Barrieren des interdisziplinären Wissenstransfers.....	107
5.3.4 Weitere Dimensionen des Kommunikationsmodells.....	111
<b>5.4 Zusammenfassung.....</b>	<b>114</b>
<b>6 Methoden und Werkzeuge der Bionik.....</b>	<b>115</b>
<b>6.1 Unterstützung der Kommunikation zwischen Experten und Laien.....</b>	<b>116</b>
6.1.1 Vorbetrachtungen.....	116
6.1.2 Triadengespräche und interpunktierte Erzählungen.....	117
6.1.3 Diskussion des Ansatzes.....	120
<b>6.2 Bestehende Ansätze zur Unterstützung des Wissenstransfers.....</b>	<b>121</b>
6.2.1 Kataloge biologischer Konstruktionen.....	121
6.2.2 Digitaler Katalog biologischer Konstruktionen.....	128

---

6.2.3 Assoziationslisten.....	129
6.2.4 Grundprinzipien biologischer Systeme.....	130
6.2.5 Gesetzmäßigkeiten und allgemeingültige Regeln.....	133
6.2.6 TRIZ und Bionik.....	136
6.2.7 Zusammenfassung.....	139
<b>6.3 Konzept eines Unterstützungssystems für das bionische Arbeiten.....</b>	<b>140</b>
6.3.1 Vorbetrachtungen.....	140
6.3.2 Wikis und semantische Wikis.....	143
6.3.3 Ontologie des Unterstützungssystems.....	146
6.3.4 Anmerkungen zur prototypischen Umsetzung.....	153
6.3.5 Prototypische Umsetzung mit Semantic MediaWiki.....	155
6.3.6 Zusammenfassung und Diskussion.....	163
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>166</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>173</b>
<b>Anhang A E-Mail mit Interviewanfrage.....</b>	<b>188</b>
<b>Anhang B Fragenbogen.....</b>	<b>190</b>

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Lebensphasen eines Produktes nach Ehrlenspiel [Ehr03, S. 43].....	3
Bild 1.2:	Struktur der Arbeit.....	7
Bild 2.1:	Technische Biologie und Bionik [Nac96].....	11
Bild 2.2:	Auswirkung der Rauigkeit auf die Benetzbarkeit hydrophiler und hydrophober Oberflächen [BN98].....	18
Bild 2.3:	Haihaut unter dem Mikroskop [LK04].....	20
Bild 2.4:	Technische Nachbildung [LK04].....	20
Bild 2.5:	Leichtflugzeug "Stingray" [SFL+06, S. 58].....	28
Bild 3.1:	Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221].....	33
Bild 3.2:	Münchener Vorgehensmodell [Lin03].....	35
Bild 3.3:	Beispiel für die Zusammensetzung von Teams nach Ehrlenspiel [Ehr95, S. 170].....	42
Bild 3.4:	"Lebenslinie" von Systemen [Alt84, S. 115].....	48
Bild 3.5:	Evolution durch vertikalen Gentransfer.....	49
Bild 3.6:	Evolution durch horizontalen Gentransfer.....	49
Bild 4.1:	Gestaltungsentwürfe für ein Schleifgerät (Chamäleon, Ente, Wels und Käfer).....	55
Bild 4.2:	Finales Konzept der Carvinghilfe.....	56
Bild 4.3:	Sicht auf eine Ampel.....	57
Bild 4.4:	Konzept der aufgelegten Klappe [Lei05, S. 89].....	58
Bild 4.5:	Konzept der eingelegten Klappe [Lei05, S. 88].....	58
Bild 4.6:	Konzept des Vorderwagens [Lei05, S. 95].....	59
Bild 4.7:	Momentenbedarf der Welle über der Drehzahl (links) und gebildete Analogie (rechts) [Gra04, S. 87].....	60
Bild 4.8:	Beispiel für die Attributionsanalogie [Kun98, S. 112].....	61
Bild 4.9:	Beispiel für Proportionalitätsanalogie [Kun98, S. 119].....	61
Bild 4.10:	Ordnungsschema für Kreativitätstechniken und die Wahrscheinlichkeit, innovative Produktideen zu generieren [GEK01, S. 123].....	66
Bild 4.11:	80/20-Regel – das Pareto-Prinzip.....	68
Bild 4.12:	Mehrdeutige Skizze [LDL01].....	69
Bild 4.13:	Mögliche Toleranzkurven als Abhängigkeit von Wertebereich (horizontal) und Trefferwahrscheinlichkeit.....	70
Bild 4.14:	Eingrenzung des Lösungsraumes durch Nutzung weiterer Suchkriterien.....	71
Bild 4.15:	Konzeptdreieck für das Problem, die Durchbiegung eines Balkens zu verringern [GEK01, S. 130].....	73
Bild 5.1:	Analogiebildung in der Bionik [Hil98a, S. 52].....	81
Bild 5.2:	Anleitung für bionisches Forschen und Entwickeln [KT02, S. 161].....	82
Bild 5.3:	Bioanaloge Ähnlichkeitsmatrix [KT02, S. 157].....	83
Bild 5.4:	Nutzung des biologischen Wissenspools zur Lösung technischer Probleme [Rum04].....	84
Bild 5.5:	Bionischer Vorgehenszyklus nach Gramann [Gra04, S. 98].....	87
Bild 5.6:	Bionic Algorithm nach Schilling et al. [SFM+05].....	89
Bild 5.7:	Mögliche Aspekte einer analogen Gegenüberstellung.....	95
Bild 5.8:	Zusammentragen der Aspekte.....	95
Bild 5.9:	Aufbauen der Beziehungsnetzwerke.....	96
Bild 5.10:	Zusammenführen der relevanten Aspekte.....	97
Bild 5.11:	Basic cycle of reflective practise [Dor97, S. 74].....	100
Bild 5.12:	Kommunikationsmodell nach Shannon & Weaver [WS49, S. 34].....	102
Bild 5.13:	Kommunikationsmodell nach Schulz von Thun [Sch01, S. 14].....	102
Bild 5.14:	Beziehungsnetzwerk zwischen Biologen und Ingenieuren.....	104
Bild 5.15:	Bedeutungen der Ebenen nach Heppner [Hep97] und im Kommunikationsmodell.....	111
Bild 6.1:	Wissensprofile von Biologen und Ingenieuren.....	117

---

Bild 6.2:	Wissenslücken bei der Kommunikation zwischen Experten und Laien sowie bei der Kommunikation zwischen Novizen und Laien.....	119
Bild 6.3:	Katalog biologischer Konstruktionen nach Hill [Hil98a, S. 3].....	123
Bild 6.4:	Abfolge der hinterlegten Seiten im "Analogie-Sucher" [Sch06b].....	128
Bild 6.5:	Auszug aus der Assoziationsliste von Gramann [Gra04, S. 140].....	129
Bild 6.6:	Auswahl von Grundprinzipien biologischer Systeme [Nac98b; MR98; KT02].....	131
Bild 6.7:	Zusammenstellung ausgewählter Konstruktionsprinzipien [Kes54; Suh90; PB93].....	132
Bild 6.8:	Goldener Schnitt bei Rechtecken.....	135
Bild 6.9:	Goldener Schnitt im eingespannten Balken.....	136
Bild 6.10:	Integration der Bionik in die TRIZ-Werkzeuge [Gün04].....	138
Bild 6.11:	Beispiel einer semantischen Relation.....	144
Bild 6.12:	Beispiel einer Relation zu einem Attribut.....	145
Bild 6.13:	Beispiel einer Klassenhierarchie.....	146
Bild 6.14:	Ableitung der Konzepte des Unterstützungssystems aus dem bionischen Analogiemodell.....	149
Bild 6.15:	Auswahl möglicher Unterklassen des Konzeptes "Analogieaspekt" in OWL-Graphen-Darstellung.....	150
Bild 6.16:	Relationen und Eigenschaften der Konzepte „Publikation“ und „Organisation“.....	152
Bild 6.17:	Einordnung semantischer Wiki-Software.....	154
Bild 6.18:	Aufbau eines Artikels im Umterstützungssystem.....	157
Bild 6.19:	Auszug aus der Bildergalerie im Unterstützungssystem.....	158
Bild 6.20:	Aufbau der Seite „Einfache semantische Suche“.....	159
Bild 6.21:	Infobox mit eingehenden Links.....	160
Bild 6.22:	Aufbau der factbox in Semantic MediaWiki.....	161

## Verwendete Abkürzungen

### Fachliche Abkürzungen

API	Application Programming Interface
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CAO	Computer Aided Optimisation
CMS	Content Management System
DfX	Design for X
FEM	Finite Elemente Methode
FOAF	Friend of a Friend
ICED	International Conference on Engineering Design
IPE	Integrierte Produktentwicklung
KI	Künstliche Intelligenz
OWL	Web Ontology Language
PDM	Produkt-Daten-Management
RDF	Resource Description Framework
SKO	Soft Kill Option
TMCE	Tools and Methods of Competitive Engineering
TRIZ	Teorija Rešenija Izobretatel'skich Zadač (Theorie des erfinderischen Problemlösens)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
XML	Extensible Markup Language

### Grammatikalische Abkürzungen

bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
f.	folgende Seite
ff.	folgende Seiten
ggf.	gegebenenfalls
u. a.	und andere
u. ä.	und ähnliches
u. v. a. m.	und vieles andere mehr
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
Hrsg.	Herausgeber
FH	Fachhochschule
S.	Seite(n)
TU	Technische Universität

*Traue keiner Innovation, die nicht vorübergehend  
Unordnung und Unsicherheit in dein Leben bringt.*

*HANS-JÜRGEN QUADBECK-SEEGER*

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Innovationen, so ist oft zu hören, sind die Voraussetzung für langfristigen Erfolg und wirtschaftliches Wachstum. Zudem verlange der Markt in immer kürzeren Abständen nach neuen Produkten, die den wachsenden und ständig wechselnden Kundenbedürfnissen Rechnung tragen. Bei dieser Argumentation wird häufig übersehen, dass rund 80 Prozent der Bevölkerung Veränderungen eher skeptisch gegenüber steht [Sim99, S. 7]. Etwas Neues, das Gewohntes zu ersetzen versucht, wird in der Regel abgelehnt. Dies gilt auch für neue Produkte<sup>1</sup>.

Unterstützt wird diese Sichtweise durch drei Beobachtungen. Zum einen kann sich die Verkürzung der Produktentwicklungszeit nachteilig auf die Produktqualität auswirken. Spektakuläre Meldungen der jüngeren Vergangenheit wie der nicht bestandene „Elchtest“ der A-Klasse von Mercedes Benz [Kno97] und die Rückrufaktionen namhafter Hersteller [WDR04; COM05; Nür05] zeugen davon, dass unausgereifte Produkte auf den Markt gebracht wurden. In vielen dieser Fälle wurde zugunsten einer schnellen Marktpräsenz auf ausführliche Produkttests verzichtet. Der Leidtragende ist in der Regel der Kunde.

Zum anderen ist festzustellen, dass die meisten Märkte einen Sättigungsgrad erreicht haben, der ein weiteres Wachstum behindert<sup>2</sup>. Kurze Innovationszyklen in diesen Bereichen führen nicht zwingend zu mehr Wachstum. Viele Kunden sehen nicht die Notwendigkeit, in immer kürzeren Zeitabständen in neue Produkte zu investieren. VON BRAUN fragt zu Recht nach dem Nutzen von Produkten, die

---

<sup>1</sup> Die Zurückhaltung gegenüber neuen Produkten wird auch im Kaufverhalten deutlich. Nach ROGERS [Rog62] werden fünf Konsumententypen unterschieden, deren Kaufbereitschaft von der Reifephase eines Produktes abhängt: Innovatoren (2,5%), Frühe Adoptoren (13,5%), Frühe Mehrheit (34%), Späte Mehrheit (34%), Nachzügler (16%)

<sup>2</sup> So lag z. B. die weltweite Jahresproduktion der Automobilhersteller im Jahr 2000 bei 80 Millionen Stück. Nachgefragt wurden hingegen nur 60 Millionen Fahrzeuge [Bra97, S. 310].

„schon wieder veraltet sind, bevor der Kunde gelernt hat, sie richtig zu beherrschen oder sie auch nur abschreiben konnte“ [Bra97, S. 310].

Zum dritten sei darauf verwiesen, dass die Entwicklungsgeschichte der Menschheit durch lange Zeiträume gekennzeichnet ist, in denen keine erkennbaren Fortschritte und Innovationen stattfanden. Noch heute gibt es Naturvölker, deren Lebensstil über tausende Jahre nahezu unverändert blieb. Es darf daher bezweifelt werden, dass die kontinuierlich betriebene Beschleunigung des technischen Fortschritts zwingend notwendig für das menschliche Überleben ist.

Die oben aufgeführten Argumente lassen den Schluss zu, dass der „laute Ruf nach Innovationen“ nicht von den Kunden ausgeht. Vielmehr scheinen die Firmen selbst ein existentielles Interesse an neuen Produkten und deren schnellen Markteinführung zu haben. „*Innovation ist für Unternehmen, was Sauerstoff für den Menschen ist*“ [Trø97, S. 247]. Innovationen versprechen Wachstum. Wachstum wiederum benötigen Unternehmen, um Gewinne erwirtschaften zu können [Bun88]. Doch gesättigte Märkte behindern ein weiteres Wachsen. Gewinne lassen sich hier nur dann erzielen, wenn Umsätze *früher* realisiert werden. Die Unternehmen versuchen dies z. B. durch eine frühere Marktpräsenz und schnellere Produktwechsel zu erreichen<sup>3</sup>. Hierzu genügt es nicht, Produktinnovation zu betreiben; auch die Strukturen und Abläufe eines Unternehmens müssen kontinuierlich verbessert und den veränderten Bedingungen angepasst werden. Dieser Aspekt der Innovation wird in der öffentlichen Diskussion nur unzureichend berücksichtigt.

Frühere Marktpräsenz und schnellere Produktwechsel wirken sich unmittelbar auf die Lebensdauer der Produkte aus. Vereinfacht lässt sich feststellen, dass sich die Lebensdauer eines Produktes aus der Addition der Längen seiner Lebensphasen ergibt. Die in Bild 1.1 genannten Phasen sind produktunabhängig, d. h. sie können bei allen Produkten identifiziert werden. Dauer und Ausprägung der einzelnen Phasen unterscheiden sich jedoch in Abhängigkeit vom betrachteten Produkt.

Soll ein Produkt früher auf den Markt gebracht werden und dort ein bereits existierendes ablösen, so wirkt sich dies auf die Lebensphasen *beider* Produkte aus. Die kürzer werdenden Produktwechselzeiten zwingen zunehmend dazu, das *alte* Produkt zu einem Zeitpunkt auszutauschen, der vor dem Ende seiner funktionellen Lebensdauer liegt; d. h. seine Nutzungsphase wird verkürzt. Da dies jedoch im Widerspruch zum Kundeninteresse steht, wenden die Unternehmen enorme Anstrengungen auf, um ihre Kunden dennoch zum Erwerb neuer Produkte zu animieren.

Um eine frühere Marktpräsenz zu erreichen, müssen die Phasen, in denen das *neue* Produkt erstellt wird (Planung, Entwicklung, Fertigung und Vertrieb), „schneller als sonst“ durchschritten werden.

<sup>3</sup> VON BRAUN stellt heraus, dass unter diesen Bedingungen das „Wachstum“ nur solange möglich ist, wie die Unternehmen in der Lage sind, die Beschleunigung beizubehalten [Bra97, S. 309]. In ähnlicher Weise argumentiert auch NACHTIGALL [Nac98a, S. 305 ff.]. Dass die Verkürzung der Produktlebenszyklen Grenzen hat, ist einsehbar. Die daraus folgenden Konsequenzen für Wirtschaft und Gesellschaft werden u. a. in [Bra97; Sch97a; Sch97b] diskutiert.

Besonderes Potential, das *time-to-market* signifikant zu verkürzen, bietet die Phase „Entwicklung und Konstruktion“. Sie lässt sich – verglichen mit den anderen – relativ schnell verändern und ist zudem mit verhältnismäßig geringen Investitionskosten verbunden. Ein Zeitvorteil lässt sich zum einen durch eine Verkürzung der Teilprozesse der Produktentwicklung, zum anderen durch einen höheren Grad an Parallelisierung erreichen. Im Schrifttum werden beide Ansätze intensiv diskutiert.

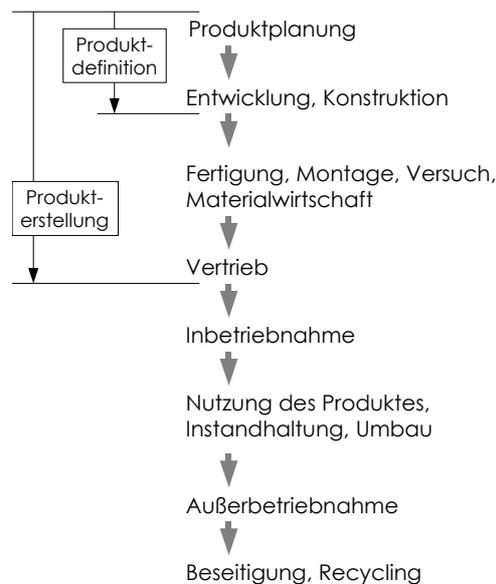


Bild 1.1: Lebensphasen eines Produktes nach EHRENSPIEL [Ehr03, S. 43]

Die obengenannten Bestrebungen zielen in erster Linie darauf ab, die Produktentwicklung effizienter zu gestalten, d. h. Produkte schneller und besser zu entwickeln. Sie führen nicht zwingend zu „besseren“ Produkten. „Gut Ding will Weile haben“, weiß der Volksmund zu berichten. Überträgt man dies auf die Produktentwicklung, so verwundert es nicht, dass die als Innovationen gepriesenen Produkte, aus der Nähe betrachtet, oft nichts weiter sind als „Anpassungserneuerungen“ und „Weiterentwicklungen“. Beide Arten der Neuerung sind zweifelsfrei notwendig, doch stellen sie keine „Innovation im engeren Sinne“ dar [Sim99, S. 7]. Technischer Fortschritt ist in der Regel nur von „Durchbruchinnovationen“ zu warten. Es scheint, dass diese Art von Innovation den Kunden am ehesten zu verkaufen ist. So führt BERTH an, dass die durchschnittliche Rendite von Durchbruchinnovationen bei etwa 15 Prozent liegt. Mit kleinen Anpassungen hingegen verdient ein Unternehmen fast nichts [Sim99, S. 8].

Doch wie kommt man zu „wahren“ Innovationen? Wie lassen sich neue Ideen generieren und schnell in marktfähige Produkte überführen? Die Antworten auf diese Fragen sind vielschichtig. Schlagworte wie „Kreativitätstechniken“ und „Innovationsmanagement“ sind dabei genauso Bestandteil der Antwort, wie die Schaffung eines kreativitätsfördernden Umfeldes durch geeignete Organisationsstrukturen und gestaltete Arbeitsplätze.

Ein weiterer Teil der Antwort lässt sich vermutlich durch die Analyse von Produkten finden, die im allgemeinen zu den Durchbruchinnovationen gezählt werden. Diese Produkte enthalten oft Elemente, die einzeln zwar bereits bekannt waren, aber noch niemals zuvor in dieser Art und Weise kombiniert wurden. So wurde z. B. im Explosionsmotor von HUYGENS, einem Vorgänger moderner Verbrennungsmotoren aus dem Jahr 1674, in einem Zylinder Schießpulver gezündet. Durch die Detonation wurde ein Kolben bewegt und Arbeit verrichtet [WIK06a; WIK06b]<sup>4</sup>. Die wesentlichen Elemente der Maschine waren keineswegs neu; Zylinder und Kolben wurden bereits in der griechischen Antike verwendet und Schießpulver ist seit Mittelalter in Europa bekannt. Eine Kombination in dieser Form jedoch war bis dahin unbekannt. Ähnliches gilt für andere Innovationen. Offensichtlich basiert die *„Neuigkeit eines technischen Systems (...) nicht auf der Neuigkeit seiner Objekte, sondern auf deren Relationen“* [Gra04, S. 9]. PORTER argumentiert in ähnlicher Weise, wenn er schreibt: *„Innovation bedeutet (...) die generelle Ermittlung neuer Kombinationsmöglichkeiten“* [Por97, S. 94].

Nach SIMON kommt es zu „spektakulären Innovationen“, *„wenn eine Idee, die in einem Fachgebiet funktioniert, auf ein anderes übertragen wird“* [Sim99, S. 102]. Eine Innovation ist umso spektakulärer, je weiter die kombinierten Objekte thematisch auseinander liegen<sup>5</sup>. So hat die Integration eines MP3-Players in ein Mobiltelefon zwar einen gewissen Neuheitswert, aber sie scheint verglichen mit der Entwicklung schmutzabweisender Textilien [SMS+04] durch die Nutzung einer mikrostrukturierten Oberfläche nach dem Vorbild der Lotus-Blume weniger innovativ.

Im obengenannten Beispiel der schmutzabweisenden Textilien wurde bekanntes Wissen der Biologie in einen neuen Kontext gestellt und aus technischer Sicht interpretiert. Damit wurden zwei Wissensgebiete miteinander verknüpft, zwischen denen keine nennenswerten Querverbindungen bestehen. Es handelt sich um ein Beispiel aus der *Bionik*, einer transdisziplinär angelegten Wissenschaftsdisziplin, die vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) wie folgt definiert wurde:

*„Bionik als Wissenschaftsdisziplin befaßt sich systematisch mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktion, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme“* [Neu93].

Die Bionik hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die in der Öffentlichkeit bekannt gewordenen „Paradebeispiele“, wie die selbstreinigenden Oberflächen nach dem Vorbild der Lotus-Pflanze [BNC04], Schwimmanzüge, die die Struktur der Haifischhaut nachbilden [Jün03], oder

<sup>4</sup> Die Informationen entstammen der freien Online-Enzyklopädie „Wikipedia“. Da das System keiner redaktionellen Kontrolle unterliegt, bietet Wikipedia keine Garantie für die Vollständigkeit und Richtigkeit der Artikel. Der Leser ist daher aufgefordert, Informationen und Zitate, bei denen ein Wikipedia-Artikel als Quelle angegeben ist, besonders kritisch zu hinterfragen.

<sup>5</sup> HILL bezeichnet die Entfernung zum Ausgangsproblem als Analogieweite. Sie stellt ein Maß für die Originalität der Analogie dar [Hil98a, S. 123].

die selbstschärfenden Schneidwerkzeuge, die Nagetierzähnen nachempfunden sind [Fra05], haben ein Bewusstsein für die Bionik geschaffen und die Aufmerksamkeit der Industrie erregt. Bionik gilt als Innovationsmotor und als Hoffnungsträger, die „lahmende Konjunktur wieder in Schwung zu bringen“. Dies kommt nicht zuletzt auch in den Förderprogrammen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zum Ausdruck [BMBF05].

Kritiker werfen der Bionik vor, mehr Schein als Sein zu präsentieren. Sie argumentieren, dass viele der genannten Beispiele nicht durch eine systematische Übertragung von Prinzipien entstanden sind, sondern eher auf zufällige strukturelle Ähnlichkeit zurückzuführen sind. So soll die Säge ihr Vorbild in Fischgräten haben, und das Prinzip der Saugnäpfe sollen Krakenarmen abgeschaut worden sein [Vog00, S. 237 f.]. Kritisiert werden u. a. auch Vergleiche zwischen Samenkorn und Fallschirm, Vogelschnabel und Pinzette sowie Analogien zwischen den Grabschaufeln eines Maulwurfs und denen eines Baggers. In der Tat scheinen die angeführten Vergleiche fragwürdig, zumal die Entstehungsgeschichte vieler technischer Lösungen heute nicht mehr nachvollziehbar ist. Darüber hinaus lassen sich Beispiele für Produkte finden, in denen die angegebenen Analogien zu natürlichen Lösungen einer näheren Betrachtung nicht standhalten [Vog00, S. 239 ff.]. Die Produkte wurden im Nachhinein „bionisiert“.

Die Entwicklung bionischer Produkte scheint nicht so trivial zu sein, wie es das Schrifttum zum Teil suggeriert. Bionik zu betreiben, erfordert die Überwindung von Grenzen zwischen Biologie und der Ingenieurwissenschaft. Mit den etablierten, an klassischen Fächern orientierten Denk- und Vorgehensweisen ist dies jedoch nicht realisierbar. Es sind daher neue Formen der Zusammenarbeit und andere Arbeitsmethoden gefragt. Im Schrifttum der Bionik ist hierzu überraschend wenig zu finden. Es ist bekannt, dass Bionik auch Analogieforschung ist [Nac98a, S. 61] und dass es gelingen muss, Assoziationen zwischen verschiedenen Wissensdomänen zu bilden [Hil98a, S. 6]. Doch wie lässt sich dies in der industriellen Praxis realisieren? Welches Wissen der Biologie ist relevant für Entwicklung technischer Produkte? Welche Voraussetzung müssen gegeben sein, damit der Transferprozess erfolgreich verläuft, und wie lässt sich dieser Prozess unterstützen? Die vorliegende Arbeit will diese Fragestellungen beleuchten. Sie will die Potentiale und Grenzen der Bionik herausstellen und Möglichkeiten aufzeigen, wie sich das bionische Arbeiten unterstützen lässt.

## **1.2 Forschungsmethodik**

Wie viele Dissertationsschriften ist auch diese Arbeit das Resultat einer Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an einer Universität. Die Forschungsmethodik gründet sich daher auf die hier verfügbaren Möglichkeiten. Die vorliegende Arbeit spiegelt Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Mitarbeit an Industrieprojekten, der Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten und nicht zuletzt

auch der Betreuung von Projekten der Studienrichtung „Integrierte Produktentwicklung“, die an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg angeboten wird, wider. Als weitere Quelle ist die inzwischen recht umfangreiche Literatur zum Thema Bionik zu nennen. Bei der Sichtung der Publikationen stellte sich jedoch heraus, dass diese sich oft auf die Darstellung der Ergebnisse beschränken. Für diese Arbeit ist es jedoch der Weg, der zu diesen Ergebnissen führte, von besonderem Interesse. Da hierzu im Schrifttum der Bionik relativ wenig zu finden ist, wurden Interviews mit Personen geführt, die an der Entwicklung bionischer Produkte mitwirken. Ziel der Interviews war es, den Entwicklungsprozess bionischer Produkte zu beleuchten und transparent machen.

Insgesamt wurden 22 Personen aus 17 Organisationen angeschrieben und um ein Interview gebeten. Dieses Interview sollte per Video aufgezeichnet werden, um eine spätere Auswertung zu erleichtern. Von den angeschriebenen Experten beantworteten 11 die Anfrage. In ihren Antworten lehnten 2 Personen mit dem Hinweis auf Zeitmangel und vorhandene Publikationen das Interview ab. 5 Personen äußerten sich unbestimmt oder baten um die Zusendung eines schriftlichen Fragenkatalogs, den sie zu einem späteren Zeitpunkt beantworten wollten. Die verbleibenden 4 Experten erklärten sich für ein Interview bereit.

Es mag kritisch erscheinen, eine wissenschaftliche Arbeit auf Erkenntnissen aufzubauen, die den obengenannten Quellen entstammen. Die verfügbare Datenbasis ist sehr klein und wenig repräsentativ. Zudem lassen sich studentische Entwicklungsprojekte nur bedingt mit realen Entwicklungsprojekten vergleichen. Doch wie sieht ein typisches Entwicklungsprojekt aus? Im Rahmen der Forschung der Konstruktionsmethodik entstanden Modelle, die den Ablauf von Entwicklungsprojekten zu beschreiben versuchen (vgl. Kapitel 3.1). Dabei ist festzustellen, dass dies nur auf einer relativ abstrakten Ebene geschehen kann. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass der Produktentwicklungsprozess durch zahlreiche Faktoren beeinflusst wird, mit dem Ergebnis, dass kein Entwicklungsprojekt dem anderen gleicht. Erkenntnisse, die anhand eines Projektes gewonnen wurden, können zwar genutzt werden, um Thesen aufzustellen, doch zur Validierung dieser Thesen ist es erforderlich, Entwicklungsprojekte reproduzierbar zu gestalten. Bislang ist in der Forschung der Konstruktionswissenschaft keine Möglichkeit bekannt, alle Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkungen zu erfassen und gegebenenfalls konstant zu halten. Somit bleiben Studien, die das Wesen des Produktentwicklungsprozesses beschreiben wollen, letztlich Einzelfallstudien. Wegen der oben dargestellten Problematik haben Aussagen, die auf Einzelfallstudien und Selbstbeobachtung beruhen, in der Konstruktionswissenschaft inzwischen einen festen Platz. Sie müssen jedoch vom Leser kritisch hinterfragt werden.

### 1.3 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Ihre Struktur ist aus Bild 1.2 ersichtlich. In den Kapiteln 2 und 3 werden zunächst die für diese Arbeit relevanten Themen dargestellt und der Problemkreis skizziert. Das Kapitel 2 gibt dem Leser einen Überblick über die Bionik. Die Ausführungen gehen über eine Wiedergabe des Grundverständnisses der Bionik und ihrer Teilgebiete hinaus. Durch die Darstellung einiger ausgewählter Beispiele bionischer Produkte und der Ergebnisse der Interviews wird deutlich, welchen Stellenwert bionisches Arbeiten in der Praxis hat.

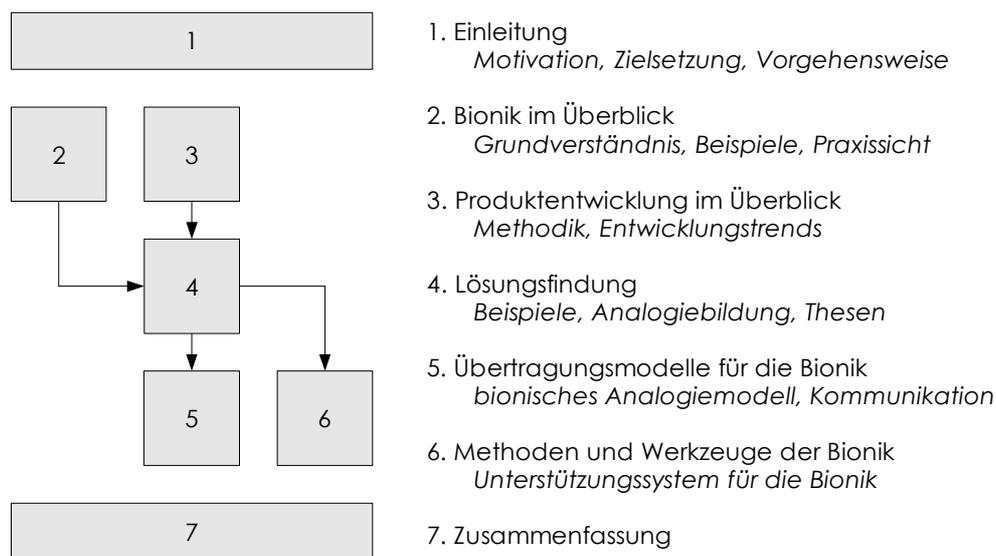


Bild 1.2: Struktur der Arbeit

Wird dem Leser in Kapitel 2 ein Grundverständnis für die Bionik vermittelt, erfolgt dies in analoger Weise in Kapitel 3 für die Produktentwicklung. Das Kapitel skizziert die Vorgehensweise des Produktentwicklers, stellt ausgewählte Methoden und Werkzeuge vor und zeigt Trends für die Entwicklung von Produkten auf. Aufgrund der Komplexität der Thematik und der daraus resultierenden Vielfalt an diskussionswürdigen Problemfeldern kann die Darstellung nur einen kleinen Auszug des Standes der Technik wiedergeben. Es wurde jedoch versucht, jene Aspekte herauszugreifen, die Berührungspunkte zur Bionik aufweisen.

Das Kapitel 4 widmet sich der Lösungsfindung. Anhand einiger Beispiele wird gezeigt, wie die Lösungsfindung in der Praxis verläuft. Die Darstellung fokussiert dabei nicht auf Entwicklungsprojekte, bei denen die Entwicklung bionischer Produkte im Vordergrund stand. Vielmehr wird dargestellt, wie der Produktentwickler im „Konstruktionsalltag“ zu Lösungsansätzen kommt und welche Rolle Analogien in diesem Prozess spielen. Darauf aufbauend werden Fragestellungen der Analogiebildung und des fachübergreifenden Wissenstransfer herausgearbeitet und in Form von Thesen zusammengefasst.

Im Kapitel 5 wird der Wissenstransfer zwischen Biologie und Technik aus theoretischer Sicht beleuchtet. Zunächst werden bekannte Übertragungsmodelle vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss daran wird ein Analogiemodell für die Bionik entwickelt. Des Weiteren wird im Kapitel 5 die Kommunikation von Biologen und Ingenieuren als wichtige Einflussgröße für ein erfolgreiches bionisches Arbeiten herausgestellt. Der Wissenstransfer zwischen Biologen und Ingenieuren wird in Form eines Kommunikationsmodells beschrieben. Wichtige Barrieren, die dem Wissenstransfer entgegenstehen, werden aufgezeigt.

Das Kapitel 6 beschäftigt sich mit Ansätzen, die den fachübergreifenden Wissenstransfer unterstützen und so helfen können, die obengenannten Kommunikationsbarrieren zu überwinden. Ausgehend von der Darstellung und Diskussion bestehender Methoden und Werkzeuge wird ein Konzept für ein Unterstützungssystem für die Bionik erarbeitet. Hierbei handelt es sich um ein Werkzeug für den Produktentwickler, das dieser im Rahmen der Lösungsfindung für die Recherche nach bionisch relevanten Strukturen nutzen kann.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und zeigt Anknüpfungspunkte für weiterführende Arbeiten auf.

Abschließend sei bemerkt, dass in dieser Arbeit die Bezeichnungen „Produktentwickler“, „Konstrukteur“ und „Ingenieur“ häufig synonym gebraucht werden. Sie bezeichnen die Profession sowohl in männlicher als auch in weiblicher Fassung. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit zumeist von *dem* Produktentwickler gesprochen ungeachtet der Tatsache, dass Produktentwicklungsprozesse in der Regel in einem Team, in dem nicht nur Ingenieure mitwirken, stattfinden. Es handelt sich um sprachliche Vereinfachungen mit dem Ziel, die Lesbarkeit des Textes zu verbessern.

Die Literaturquellen in dieser Arbeit werden z. T. durch Seitenzahlen belegt. Dies ist dann der Fall, wenn dem Leser durch die Seitenangabe das Auffinden einer konkreten Information (z. B. direkte oder indirekte Zitate) erleichtert wird. Eine Ausnahme bilden Quellen für die keine Seitenzahlen existieren (z. B. Internetseiten). Auf die Angabe von Seitenzahlen wird auch dann verzichtet, wenn die Information oder die Abbildung, auf die verwiesen wird, beim schnellen Durchblättern der Quelle sofort ins Auge fällt oder wenn auf ein Werk als Ganzes referenziert wird.

*Unendlich spät haben wir an eine  
technische Umsetzung gedacht.*

*WILHELM BARTHOLOTT*

## 2 Bionik im Überblick

Bionik ist eine Wortschöpfung, die sich aus den Begriffen *Biologie* und *Technik* zusammensetzt. Sie wird dem amerikanischen Luftwaffenmajor J. E. STEELE zugeschrieben, der auf einer Konferenz im Jahr 1960 das Wort *bionics* erstmalig verwendete<sup>1</sup> [Gér68 zitiert nach Nac92]. STEELE definierte Bionik als „*Wissenschaft von Systemen, deren Funktionen auf lebenden Systemen basieren, oder die charakteristischen Eigenschaften lebender Systeme haben, oder diesen ähnlich sind*“ [Vog00, S. 238].

Bionik ist keine Erfindung der Neuzeit. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die Menschen seit jeher die Natur beobachten, aus den Beobachtungen Erkenntnisse gewinnen und diese Erkenntnisse für sich nutzbar machen. Hinweise auf ein „Abschauen von der Natur“ sind bereits in der griechischen Mythologie zu finden; bekanntermaßen flohen Daedalus und sein Sohn Ikarus aus kretischer Gefangenschaft mit Flügeln, die denen der Vögel nachempfunden waren.

LEONARDO DA VINCI wird häufig als Begründer der modernen Bionik gesehen [Bra05]. Er studierte die Natur und suchte gleichzeitig nach Anwendungsmöglichkeiten für die gewonnenen Erkenntnisse. Sein besonderes Interesse galt dem Vogelflug. Er untersuchte beispielsweise, wie sich die Überlapung der Federn eines Vogelflügels auf die Luftströmung auswirken und machte Vorschläge für eine technische Adaption in Form von Flügelklappen [Nac98a, S. 8 f.]. In seinen Aufzeichnungen finden sich unter anderem Skizzen eines Flugapparates, der durch natürliche Vorbilder inspiriert wurde.

In den letzten Jahren ist die Bionik wieder stärker in das Blickfeld der Forschung gerückt. Zunehmend beginnen auch Unternehmen sich für die Bionik zu interessieren. Auslöser für diesen Trend sind die publizierten „Paradebeispiele“ erfolgreicher Adaption natürlicher Lösungen und Prinzipien, wie z. B. die Selbstreinigung durch den Lotus-Effekt [BN98; BNC04] oder die beson-

<sup>1</sup> Ob der Begriff durch STEELE selbst geprägt wurde oder aber während der Tagung als griffiges Schlagwort entstanden ist, lässt sich dem Konferenzband nicht entnehmen [Nac98a, S. 6].

deren Eigenschaften der Haifischhaut, die den Strömungswiderstand reduzieren [Bec98]. Diese „Erfolgsgeschichten“ zeigen, wie die Natur zur Lösung technischer Problemstellungen beitragen kann. Sie nähren darüber hinaus die Hoffnung der Unternehmen, dass von der Natur inspirierte Lösungen zu innovativen Produkten führen.

Die intensiven Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Bionik brachten in den letzten Jahren eine Reihe beachtlicher Resultate hervor. Sie reichen von grundlegenden Erkenntnissen, deren technische Nutzbarkeit sich derzeit noch nicht abschätzen lässt<sup>2</sup>, bis hin zu Lösungsvorschlägen, die bereits als technische Produkte realisiert wurden. Eine ausführliche Darstellung und Würdigung der Bionik-Forschung kann und soll an dieser Stelle nicht erfolgen. Dennoch erscheint es sinnvoll, dem Leser das Grundverständnis der Bionik zu vermitteln und einige charakteristische Beispiele vorzustellen.

In diesem Kapitel wird zunächst das Selbstverständnis der Bionik skizziert und die Vielfalt bionischer Forschung anhand ihrer Teilgebiete dargestellt. Im Anschluss daran werden einige „Highlights“ der Bionik vorgestellt. Neben der eigentlichen Darstellung des bionischen Lösungsansatzes wird auch versucht, den Entwicklungsweg kritisch zu beleuchten. Abschließend werden die Ergebnisse der Interviews mit „Bionikern“ präsentiert. Diese „Sichtweisen aus der Praxis“ runden das Bild der Bionik ab.

## 2.1 Bionik im Schrifttum

Im Folgenden wird der Begriff „Bionik“ und die Philosophie des bionischen Arbeitens näher erläutert. Zudem werden die Aktivitäten im Bereich der bionischen Forschung umrissen.

### 2.1.1 Begriffsklärung und Grundverständnis

Bionik steht für das Lernen von der Natur für die Technik. ISENMANN untersucht die „*Natur-als-Vorbild-Welle*“ [Ise98, S. 129] und stellt zwei Lager heraus, die sich scheinbar unvereinbar gegenüber stehen. Zum einen nennt er die Befürworter, die die Natur in jeder Hinsicht als Vorbild sehen [Com73; AG91], zum anderen die Zweifler, die die Idee von „Natur als Vorbild“ grundsätzlich ablehnen [GG94; Bir97]. Der Bionik liegt eine „*versteckte Naturphilosophie*“ [Ise98, S. 135] zugrunde. Da die Grundannahme, dass Natur als Vorbild dienen kann, in den Wissenschaften keineswegs unbestritten ist, sieht ISENMANN es als wichtige Aufgabe der Bionik an, in diesen Fragen Stellung zu beziehen, wenn sie als eigenständige Wissenschaft ernst genommen werden will. Dabei wird nach Ansicht von ISENMANN deutlich werden, dass ein Lernen von der Natur nicht nur „*möglich und plausibel*“, sondern im Hinblick auf die Entwicklung einer nachhaltigen Technik auch „*geboten und nützlich*“ [Ise98, S. 130] ist.

<sup>2</sup> Als Beispiel seien hier die von RÜPPEL entdeckten Kommunikationssignale von Libellen genannt [Rüp04].

NACHTIGALL konstatiert, dass man die Lösungen der Natur nicht nutzen kann, wenn man sie nicht kennt und nicht versteht. Daher ist „die Analyse der Natur unter Einbeziehung physikalisch-technischen Know-hows“ ein unverzichtbarer erster Schritt. Dieser Schritt stellt „die Basis für ein Durchforsten der Natur nach technologisch Verwertbarem“ [Nac92, S. 1] dar. In seinem Modell unterscheidet NACHTIGALL zwischen der *Technischen Biologie* und der *Bionik* (Bild 2.1). Die Technische Biologie versteht er als Grundlagenforschung, während die Bionik die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse darstellt.

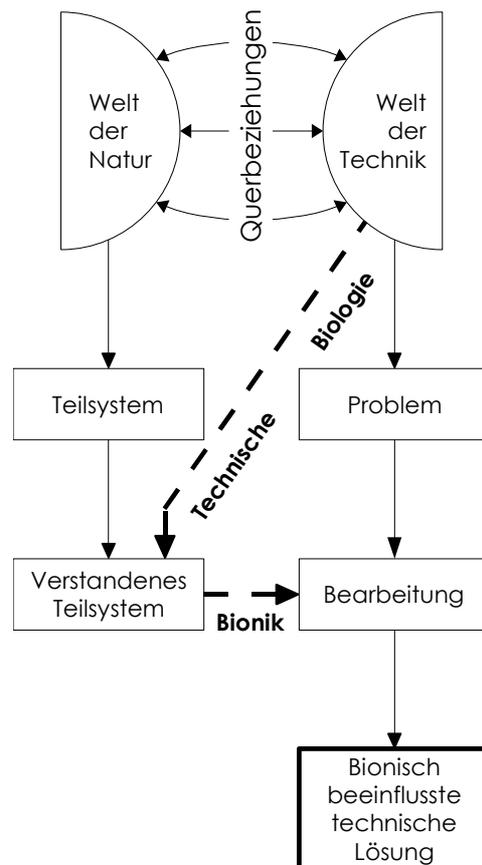


Bild 2.1: Technische Biologie und Bionik [Nac96]

Eine andere Differenzierung schlägt ZERBST vor. Er unterteilt die Bionik in *Allgemeine Bionik*, *Systematische Bionik* und *Angewandte Bionik*. Die Allgemeine Bionik betrachtet die Erscheinungen in der Natur „aus dem Blickwinkel eines abschätzenden Suchers“ [Zer87, S. 17]. Sie untersucht, welche natürlichen Strukturen, Prozesse und Wechselwirkungen prinzipiell zur Lösung technischer Problemstellungen interessant sein könnten. Mit der Systematischen Bionik werden die gefundenen biologischen Vorbilder problemorientiert analysiert. Sie hat die Aufgabe, für die Technik eine allgemeinverbindliche „Übersetzung“ biowissenschaftlicher Fakten zu schaffen, diese zu strukturieren und in Datenbanken zu speichern [Zer87, S. 18]. Die Angewandte Bionik nutzt die Erkenntnisse und setzt sie in Form technisch realisierter Prototypen um. Durch die weitere Anpassung und Optimierung an die Randbedingungen der Technik entsteht aus dem Prototyp schließlich ein technisches Produkt.

## 2.1.2 Teilgebiete der Bionik

Die Bionik lässt sich in verschiedener Weise einteilen. NEUMANN gliedert sie in *Konstruktions-, Verfahrens- und Informationsbionik* und ordnet ihnen in einer zweiten Gliederungsstufe mögliche Forschungsfelder zu [Neu96, S. 18]. Andere Einteilungen sind z. B. bei ZERBST [Zer87, S. 17 ff.] und HILL [Hil99, S. 65] zu finden. An dieser Stelle soll die Bandbreite bionischer Forschungsaktivitäten anhand der Gliederung von NACHTIGALL [Nac98a] dargestellt werden, da diese sehr differenziert ist. NACHTIGALL unterscheidet zwischen *Historisches*<sup>3</sup>, *Strukturbionik*, *Baubionik*, *Klimabionik*, *Konstruktionsbionik*, *Bewegungsbionik*, *Gerätebionik*, *Antrophobionik*, *Sensorbionik*, *Neurobionik*, *Verfahrensbionik* sowie *Evolutionsbionik*.

Das Teilgebiet der **Strukturbionik** beschäftigt sich mit Möglichkeiten der Übertragung von Materialien und Strukturen der Natur in die Technik. Neben dem Einsatz alternativer Materialien und der Analyse biologischer Strukturen im Hinblick auf ihr Leichtbau-Potential [KL96; Hen01; Mir01] werden z. B. auch Formbildungsprozesse und Verpackungsstrategien [KT02; Küp04] untersucht. Darüber hinaus kann auch die Untersuchung der Strukturen von Oberflächen in das Teilgebiet Strukturbionik eingeordnet werden.

Die Bionik beschäftigt sich nicht nur, wie häufig dargestellt wird, mit der Analyse der belebten Welt. Auch Strukturen der nicht belebten Natur wie z. B. Schnee sind für die Forscher von Interesse [DL06]. So liefern die Wachstumsprozesse der Schneekristalle wertvolle Hinweise für die Herstellung von Nanostrukturen wie sie z. B. für Mikrochips benötigt werden. Darüber hinaus ist die poröse Struktur des Schnees für die Entwicklung schalldämmender Materialien interessant. Die feinen Spitzen der Eiskristalle werden durch Schallwellen zum Mitschwingen angeregt, verformen sich und zerbrechen schließlich. Die Schallenergie wird so in Wärme umgewandelt.

Die **Baubionik** untersucht Lösungen der Natur hinsichtlich ihres Nutzenpotentials für Architekten und Bauingenieure. In der Architektur werden Formen aus der Natur genutzt, um wirtschaftliche und ästhetisch ausgewogene bauliche Lösungen zu entwickeln [MK86, S. 8]. So erhofft man sich z. B. aus der Analyse von Eierschalen und Spinnennetzen Impulse für die Entwicklung temporärer Leichtbauten [Küp04]. Darüber hinaus werden die Eigenschaften natürlicher Baumaterialien wie Holz und Ton, die auch von Tieren zum Bau ihrer Behausungen genutzt werden, erforscht.

Die **Klimabionik** hat zahlreiche Berührungspunkte zur Baubionik. Jedoch stehen hier Aspekte der Heizung und Kühlung sowie der passiven Lüftung im Mittelpunkt der Betrachtungen. So fanden z. B. KLINGNER & MANZ [KM04] heraus, dass die Temperatur in Hornissennestern auch bei großen Schwankungen der Außentemperatur weitestgehend konstant bleibt. Die Ursache hierfür liegt zu

<sup>3</sup> Der Bereich „Historisches“ stellt die Entwicklung der Bionik anhand von überlieferten Beispielen technischer Entwicklungen dar. Er hat eine Sonderstellung und wird daher an dieser Stelle nicht betrachtet.

einem großen Teil in der besonderen Struktur des Nestes. Klimatechnisch interessant ist auch der Bau des Präriehundes. Durch die unterschiedliche Höhe der Ein- und Ausgänge entsteht aufgrund des Bernoulli-Prinzips eine Druckdifferenz, die wiederum eine Zwangsdurchlüftung des Baus zur Folge hat [VB72 zitiert nach Nac92]. Einige Termitenvölker nutzen ebenfalls den Wind, um ihre Bauten zu lüften [Tri98]. Unter den Termitenhügeln ist ein langer Gang angelegt, der bis zum Grundwasser hinunterreicht. Durch die Verdunstung des Wassers wird der Luft in der Anlage Wärme entzogen und es entstehen für die Insekten angenehme Lebensbedingungen.

Anregungen für die Klimabionik lassen sich auch in der traditionellen Architektur finden. So offenbart z. B. die Analyse von Iglus, von Hütten in Nordafrika [Tri98] oder von Häusern im Vorderen Orient [Nac01] interessante Aspekte, die für die Gestaltung moderner Bauten genutzt werden können. Es sind vor allem die Dachformen, die Materialien der Wände, die Einnischung<sup>4</sup> der Bauten in die Erde sowie ihre Ausrichtung nach Sonne und Wind, die aus Sicht der Klimabionik von Interesse sind.

Bäume sind nicht nur für die Strukturbionik interessant, sie sind ebenfalls ein Forschungsobjekt der Klimabionik. Wie OLIGMÜLLER [Oli01] darstellt, entstanden an Fassaden nach dem Vorbild ihres Ast- und Blattwerkes „transparente Lichtschwerter“ [Oli01, S. 259]. Dabei handelt es sich um einen Sonnenschutz mit lamellenförmigen Luftschlitzen. Das Sonnenlicht wird im Fensterbereich an den Schlitzen gebrochen und in die Tiefe des Raumes gelenkt. Das „harte“ Licht der Sonne wird dabei weich und angenehm. Lichtschwerter spenden einerseits bei starker Sonneneinstrahlung wirksam Schatten, andererseits schränken sie bei bewölktem Himmel das Tageslicht nicht unnötig ein.

Im Rahmen der **Konstruktionsbionik** werden die Konstruktionselemente biologischer Lösungen untersucht. Von Interesse ist dabei besonders, wie die Elemente miteinander interagieren und wie die Abstimmung erfolgt. Dabei zeigt sich, dass die Lösungen der Natur im Allgemeinen einen wesentlich höheren Grad an Funktionsintegration aufweisen, als dies bei technischen Konstruktionen der Fall ist. Darüber hinaus sind in der Natur häufig Materialien zu finden, deren Eigenschaften sich örtlich unterscheiden. So hat das Holz im Inneren eines Baumes andere Eigenschaften als das Holz der Rinde [PPO+98, S. 272]. In der Technik hingegen ist der Einsatz von Stoffen mit „fließenden“ Materialkennzahlen bislang unüblich.

Die **Bewegungsbionik** befasst sich in erster Linie mit den Bewegungsformen im Tierreich und den damit verbundenen Problemkreisen [Bli92; Lie98; Wüs98; SS05]. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen nicht nur in die Entwicklung von Laufmaschinen oder Schlagflossenantrieben ein. Auch die Kriechbewegungen von Würmern sind ein Untersuchungsobjekt der Bionik. Die Erkenntnisse lassen sich z. B. für die Entwicklung neuartiger Endoskope nutzen [HMC+04]. In der Medizin werden Endoskope bislang durch äußere Krafteinwirkungen platziert, wodurch das Gewebe häufig be-

---

4 Einnischung bezeichnet hier die Bildung von Nischen als Schutz vor der Witterung.

schädigt wird. Durch das „aktive Kriechen“ des Gerätes verringert sich das Verletzungsrisiko bei Operationen.

Für die Bewegungsbionik ist auch die Interaktion von Bewegungsorgan und Medium von Interesse. So weiß man inzwischen, dass der geringe Reibungswiderstand von Delphinen nicht allein auf die strömungsoptimierte Form der Tiere zurückzuführen ist. Die Flexibilität der Haut trägt gleichfalls maßgeblich zur Reduzierung der Wirbelbildung bei [Nac97, S. 89 f.]. Sie gibt bei Druckbelastung nach und vermindert so die Gefahr einer Wirbelbildung [Bau04].

Das Teilgebiet der **Gerätebionik** ist eng mit der Strukturbionik und der Konstruktionsbionik verknüpft. Im Fokus steht hier die Entwicklung einsetzbarer Gesamtkonstruktionen. NACHTIGALL führt als Beispiel die Nutzung eines Schlagflossenantriebs in der Pump- und Fördertechnik an [Nac98a, S. 22]. Mit einer solchen Flosspumpe lassen sich im Gegensatz zu konventionell betriebenen Pumpen auch halbflüssige Gemische problemlos transportieren.

Die **Anthropbionik** hat ihren Schwerpunkt in der Mensch-Maschine-Interaktion. Sie steht damit in enger Beziehung zur Ergonomie und zur Arbeitsplatzgestaltung. Vor diesen Hintergrund stehen Analysen der motorischen und sensorischen Gewohnheiten des Menschen im Vordergrund. Die Ergebnisse lassen sich einerseits für die Gestaltung von menschengerechteren Produkten nutzen, andererseits können z. B. Erkenntnisse über das Zusammenwirken von Muskeln und Sehnen auch Impulse für die Entwicklung von Robotern geben [Möh04].

Die **Sensorbionik** beschäftigt sich mit der Erfassung und Verarbeitung von physikalischen und chemischen Reizen in der Natur und den Möglichkeiten einer Übertragung in die Technik. Die Natur brachte eine Vielzahl hoch sensibler Sensoren hervor, die die Effizienz technischer Sensoren oft übertreffen. Durch die Analyse dieser natürlichen Sensorsysteme können nicht nur Anregungen für die Verbesserung technischer Sensoren gewonnen werden, sie helfen auch, neue Ideen für weitere Anwendungsfelder zu generieren. So weiß man z. B. inzwischen, dass der Schwarze Kiefernprachtkäfer Infrarot-Sensoren besitzt, mit denen er über viele Kilometer hinweg Waldbrände erkennen kann. Die Tiere nutzen diese Fähigkeit, um verbranntes Holz zu finden, in dem sie ihre Eier ablegen können [Sch98, S. 241]. Aus dieser Erkenntnis heraus entstand die Idee, einen „Feuerlöschkäfer“ zu entwickeln. Dabei handelt es sich um ein autonom agierendes Fahrzeug, das mit Infrarot-Sensoren und einem Löschmitteltank ausgestattet, in den Wäldern platziert wird. Derartige „Käfer“ könnten so helfen, Waldbrände frühzeitig zu erkennen und zu bekämpfen [Woh06].

Das Gebiet der **Neurobionik** kann nach LUKSCH [Luk05] in die Neuroprothetik, die Biohybridelemente und den Rechenverfahren, nach denen die Natur Informationen verarbeitet, eingeteilt werden. Das Ziel der Neuroprothetik ist es, verloren gegangene Körperfunktionen durch Prothesen zu

ersetzen und diese an das Nervensystem anzubinden. Beispiele für solche Prothesen sind Implantate im Innenohr oder in der Netzhaut des Auges. Mit der Biohybridtechnik wird versucht, die informationsverarbeitenden Elemente eines biologischen Systems mit Halbleiter-Bauelementen zu verbinden. Anwendungsgebiete für solche Biohybrid-Systeme ergeben sich z. B. für die Biosensorik. Dabei fungiert lebende Zelle als Sensor für Stoffe, für die keine technischen Sensoren zur Verfügung stehen. Die biologische Informationsverarbeitung als dritter Bestandteil der Neurobionik kann der Technik Impulse liefern, wie mit Beschränkungen des Systems umgegangen werden kann. Wichtig sind in diesem Zusammenhang z. B. Strategien, mit denen sich der Widerspruch zwischen einer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit von Signalen und einer gleichzeitig hohen Verarbeitungsqualität lösen lässt. Der Vergleich von Auge und Kamera soll hier als Beispiel angeführt werden. Herkömmliche Kamera-Systeme zeichnen ihre Umgebung kontinuierlich auf. Die Detailgenauigkeit ist im gesamten Aufnahmebereich gleich hoch. Dadurch wird eine relativ große Datenmenge generiert, die vom System ausgewertet werden muss. Vergleichbare biologische Systeme wie das Auge arbeiten hier effizienter. Sie sind in der Lage auf das zu fokussieren, was wichtig sind. Weniger wichtige Informationen werden mit einem geringeren Detaillierungsgrad wahrgenommen. Die entstehende Datenmenge ist daher kleiner und die Verarbeitung kann schneller erfolgen.

Die **Verfahrensbionik** stellt die in der Natur ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse in den Vordergrund. Die Prozesse werden vor allem hinsichtlich ihres Potentials für die Energieerzeugung untersucht. So arbeiten Forscher z. B. an der Entwicklung von „grünen Solarzellen“, bei denen nach dem Vorbild der Photosynthese Licht in elektrische Energie umgewandelt wird [Tri95, S. 148 ff.]. Daneben sind für die Forscher auch die Methoden des totalen Rezyklieren, d. h. der Vermeidung von Abfall, von Interesse.

Als letztes Teilgebiet der Bionik nennt NACHTIGALL [Nac98a] die **Evolutionsbionik**. Hierunter fallen z. B. die von RECHENBERG entwickelte *Evolutionstrategie* [Rec94] oder der von GOLDBERG vorgestellte *Genetische Algorithmus* [Gol89]. Beide Verfahren werden heute unter dem Oberbegriff *Evolutionäre Algorithmen* [Poh99] zusammengefasst. Es handelt sich um Optimierungsverfahren, die die Prinzipien der Evolution nutzen. Sie werden in der Industrie z. B. für die Optimierung von parametrischen Bauteilmodellen [VBC+04] oder für die Anpassung von Materialmodellen viskoelastischer Werkstoffe [Her06] eingesetzt.

Im Schrifttum der Bionik bezeichnet Evolutionsbionik im Wesentlichen die Entwicklung und die Anwendung evolutionärer Optimierungsverfahren. Die Charakteristika einer evolutionären Entwicklung (z. B. Zukunftsblindheit) und die zugrunde liegenden Prinzipien (z. B. Mutation und Rekombination) lassen sich jedoch auf andere Bereiche übertragen. So stellen VAJNA & BERCSEY [VB94]

mit der *Autogenetischen Konstruktionstheorie* einen Ansatz zur Beschreibung von Produktentwicklungsprozessen vor (vgl. Kapitel 3.1.2).

### 2.1.3 Zusammenfassung

Die Ausführungen oben skizzieren die Bionik in ihren wesentlichen Zügen. Dabei wird deutlich, dass die Bionik heterogen aufgestellt ist. Dies betrifft zum einen die verschiedenen Sichtweisen zum Bionik-Begriff. Zum anderen äußert es sich in der Vielfalt bionischer Forschungsaktivität.

Die genannten Teilgebiete sind vielfältig miteinander verknüpft, so dass die Grenzen zwischen den Bereichen in der Praxis verschwimmen. Darüber hinaus finden sich Ansätze, die sich nicht in die von NACHTIGALL gewählte Gliederung einordnen lassen und die die Bandbreite der Bionik nochmals erweitern. Hierzu gehören z. B. Ansätze in den Wirtschaftswissenschaften und im Organisationsmanagement, die basierend auf der Analyse des Verhaltens von biologischen Systemen Vorschläge zur Verbesserungen bestehender Konzepte und Strategien unterbreiten [AG91; Nöl04; God06]. Die ästhetische Komponente, die vielen biologischen Systemen innewohnt, und die Ansätze zur Formgebung und Gestaltung von Produkten lassen sich ebenfalls nur schlecht den genannten Teilgebieten zuordnen. Unberücksichtigt bleiben ebenfalls die Zusammenhänge zwischen Bionik, Ethik und Biopolitik [Geh05]. Zu guter Letzt seien die Ansätze zur methodischen Unterstützung und zur Didaktik der Bionik erwähnt, die ebenfalls Bestandteil der Bionik-Forschung sind [Hil98b].

Die (sicherlich immer noch unvollständige) Zusammenstellung bionischer Forschungsaktivitäten macht deutlich, dass es zunehmend schwierig wird, ein vollständiges Bild der Bionik zu zeichnen. Der Bionik-Begriff umfasst längst mehr als „Biologie“ und „Technik“. Er ist in der öffentlichen Meinung positiv belegt und wird daher häufig zu Marketing-Zwecken genutzt. Damit ist jedoch auch die Gefahr verbunden, dass der Bionik-Begriff mit Inhalten belegt wird, die der ursprünglichen Intention entgegenstehen. Umso wichtiger ist es, einen fundierten „theoretischen Unterbau“ für das Wissensgebiet zu schaffen. Hierzu gehört zum einen, ein einheitliches Verständnis von dem zu generieren, was Bionik ist und wo sie sich zu anderen Gebieten abgrenzt. Ansätze für eine wissenschaftstheoretische Betrachtung der Bionik existieren bereits [Gle98b; Ise01], jedoch werden sie scheinbar im Schrifttum nur ungenügend wahrgenommen. Zum anderen müssen auch die Arbeitsmethoden der Bionik klar definiert und in der Praxis gelebt werden. Dies ist, wie in dieser Arbeit gezeigt werden wird, nur zum Teil der Fall. Die genannten Themen werden daher im Verlauf der Arbeit diskutiert werden.

## 2.2 Beispiele bionischer Produkte

Zahlreiche populärwissenschaftliche Artikel erwecken den Eindruck einer „glanzvollen Zukunft“, in der die Bionik ungeahnte Möglichkeiten schafft. Auch wissenschaftliche Publikationen verleiten häufig zu „überzogenem Optimismus“ [Zer87, S. 17]. Die nachfolgenden Beispiele zeigen, dass die reale Entwicklung bionischer Produkte in der Regel weit weniger spektakulär ist, als dies in vielen populärwissenschaftlichen Darstellungen erscheint. Wie jedes andere Produktentwicklungsprojekt verläuft auch die Entwicklung bionischer Produkte nicht gradlinig. Bionische Produkte entstehen nicht von heute auf morgen. Ihre Entwicklung ist mit Schwierigkeiten und Misserfolgen verbunden. Und nicht selten spielt der Zufall eine nicht unbeachtliche Rolle.

### 2.2.1 Beispiel: Lotus-Effekt

Der von BARTHLOTT und NEINHUIS in [BN97; BN98; BNC04] beschriebene Lotus-Effekt gilt als das Vorzeigebispiel der Bionik schlechthin. Er bezeichnet die Fähigkeit natürlicher Oberflächen zur Selbstreinigung. Der Lotus-Effekt basiert auf einer stark reduzierten Adhäsion von Wasser. Das abfließende Wasser trägt Partikel, die auf der Oberfläche haften, davon und reinigt sie auf diese Weise. Der Effekt wurde von BARTHLOTT und NEINHUIS zwar nach der Lotuspflanze benannt, jedoch ist anzumerken, dass er nicht auf diese beschränkt ist. Das Prinzip der Selbstreinigung ist in der Pflanzenwelt weit verbreitet und ist darüber hinaus auch bei Insekten zu finden. So sind z. B. Libellen und Schmetterlinge im Gegensatz zu anderen Insekten nicht in der Lage, ihre Flügel mit den Beinen zu reinigen; die Größe ihrer Flügel hindert sie daran. Die Reinigung erfolgt durch den Lotus-Effekt [BN98, S. 290 f.].

Beim Lotus-Effekt kommen zwei physikalische Prinzipien zum Tragen. Zum einen lässt sich feststellen, dass selbstreinigende Oberflächen eine hydrophobe (wasserabweisende) Schicht aufweisen. Dabei handelt es sich in der Regel um eine Wachsschicht. Bei Pflanzen wird sie als extrazelluläre Schicht über der Epidermis ausgeprägt und heißt Cuticula. Diese Schicht ändert die Grenzflächenspannungen zwischen Luft, Wasser und Blattoberfläche mit der Folge, dass der Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Oberfläche vergrößert wird und sich auf den benetzten Blättern Wassertropfen ausbilden.

Das zweite Prinzip basiert auf der Mikrostrukturierung der Blattoberfläche. Wie im Bild 2.2 gezeigt, sorgt eine Oberflächenstrukturierung für eine Verstärkung der Benetzungseigenschaften. Im Fall einer hydrophilen (wasserliebenden) Oberfläche wird durch eine Strukturierung der Oberfläche die Oberflächenspannung weiter herabgesetzt, so dass sich ein dünner Wasserfilm ausbilden kann. Ist die

Oberfläche hingegen hydrophob, wird die Bildung von Wassertropfen unterstützt, die leicht abrollen können.

Der Lotus-Effekt wirkt auf hydrophoben und strukturierten Oberflächen. Wird eine solche Fläche mit Partikeln beschmutzt, lagern diese sich auf den Spitzen der Rauigkeit ab. Die entstehende Kontaktfläche ist relativ klein und die wirkenden Adhäsionskräfte sehr gering. Rollt ein Wassertropfen über eine so verschmutzte Oberfläche, nimmt er die lose aufliegenden Partikel mit sich und trägt sie davon. BARTHLOTT [Bar05] weist darauf hin, dass es keine Rolle spielt, ob der Schmutz hydrophiler oder hydrophober Natur ist. Handelt es sich um hydrophilen Schmutz, wird er in das Innere des Tropfens befördert und vom Blatt gespült. Reagiert der Schmutz hingegen hydrophob, lagert er sich auf der Oberfläche des Wassertropfens an und wird auf diese Weise transportiert.

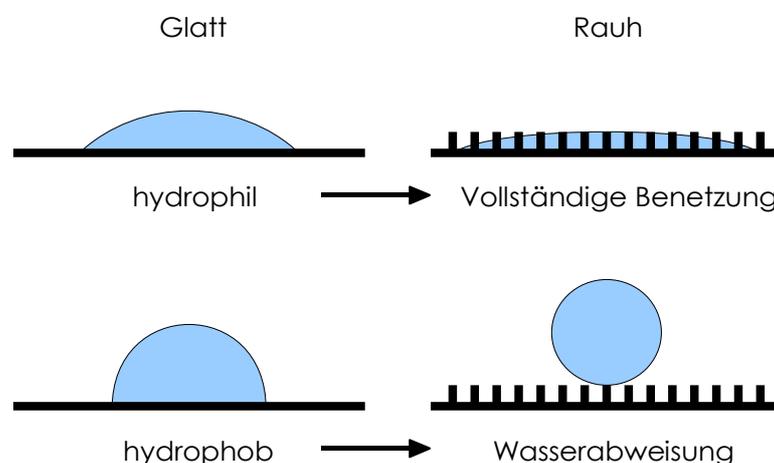


Bild 2.2: Auswirkung der Rauigkeit auf die Benetzbarkeit hydrophiler und hydrophober Oberflächen [BN98]

Da der Lotus-Effekt auf physikalischen und chemischen Prinzipien basiert, ist er auch auf technische Oberflächen übertragbar. Das Potential selbstreinigender Flächen für technische Anwendungen wurde schnell erkannt. Es ist daher nicht verwunderlich, dass der Lotus-Effekt „ein breites Interesse bei der Industrie“ [BN98, S. 291] fand und inzwischen technisch realisiert wurde. So sind auf dem Markt bzw. Farben, Lacken, Dachziegel und Textilien erhältlich, die den Lotus-Effekt nutzen [Bar05; BBF05]. Darüber hinaus gelang es, den natürlichen Effekt der Lotuspflanze zu erweitern und Beschichtungen herzustellen, die nicht nur die hydrophoben Eigenschaften ihrer biologischen Vorbilder nachbilden, sondern auch oleophob, d. h. ölabweisend reagieren. Derart beschichtete Oberflächen, die weder von Wasser noch von Öl benetzt werden können, werden als *ultraphob* bezeichnet [Bar05].

Die Unbenetzbarkeit vieler pflanzlicher Oberflächen ist seit langem bekannt. BARTHLOTT und NEINHUIS weisen darauf hin, dass es darüber hinaus seit über 100 Jahren in der Literatur „versteckte Hinweise auf die Zusammenhänge zwischen Unbenetzbarkeit und Unbeschmutzbarkeit“ [BN98, S. 282] gibt.

Eine systematische Erforschung der Ursachen des Selbstreinigungseffektes blieb jedoch aus. Die Entdeckung des Lotus-Effektes war keineswegs das Ergebnis zielgerichteter Forschung. Es handelte sich vielmehr um ein „*unbeabsichtigtes Nebenprodukt*“ [BN98, S. 291] von Untersuchungen, deren eigentliches Ziel es war, Lotusblumen hinsichtlich ihrer systematischen Stellung zu analysieren.

### 2.2.2 Beispiel: Haifischhaut

Die Haut des Haifisches ist in mehrerlei Hinsicht für die Bionik interessant. Sie wirkt zum einen reibungsreduzierend und sorgt so dafür, dass sich der Hai schnell und wendig bewegen kann [Bec98]. Zum anderen gilt die Haut des Hais als Vorbild für die Bewuchsverhinderung<sup>5</sup> [LK04]. Letzteres ist vor allem für die Schifffahrt von großem Interesse, denn durch den Bewuchs erhöht sich die Reibung der Schiffskörper und somit auch ihr Treibstoffverbrauch. Bislang wurde der Bewuchs bei Schiffen durch besondere Farbanstriche, die umweltschädliche Wirkstoffe<sup>6</sup> enthielten, verhindert. Seit dem Jahr 2003 ist dies verboten, und es wird vermehrt nach alternativen Lösungen gesucht [Bau04].

Die besonderen Eigenschaften der Haut des Haifisches sind in ihrer Oberflächenstruktur begründet. Das Bild 2.3 zeigt deutlich fein strukturierte Schuppen. Sie bestehen aus einem harten Material, sind aber dennoch untereinander beweglich [LK04]. Da Seepocken und andere Organismen nicht in der Lage sind, die Zwischenräume der Schuppen zu füllen, steht ihnen nur eine kleine Kontaktfläche zur Verfügung. Diese Fläche reicht nicht aus, um die notwendigen Haltekräfte zu übertragen.

Eine technische Nachbildung der beweglichen Schuppen mit vertretbarem Aufwand ist derzeit noch nicht möglich. LIEDERT und KESEL [LK04] vereinfachten daher die Struktur der Haifischhaut und entwickelten mikrostrukturierten Silikonmatten (Bild 2.4). Mit Hilfe dieser Matten gelingt es, den Bewuchs durch Seepocken um bis zu 95 Prozent zu senken.

---

<sup>5</sup> Der Bewuchs durch fremde Organismen (z. B. durch Seepocken) wird *Biofouling* genannt [LK04].

<sup>6</sup> Als Biozid wurde Tributylzinn (TBT) eingesetzt [Bau04].

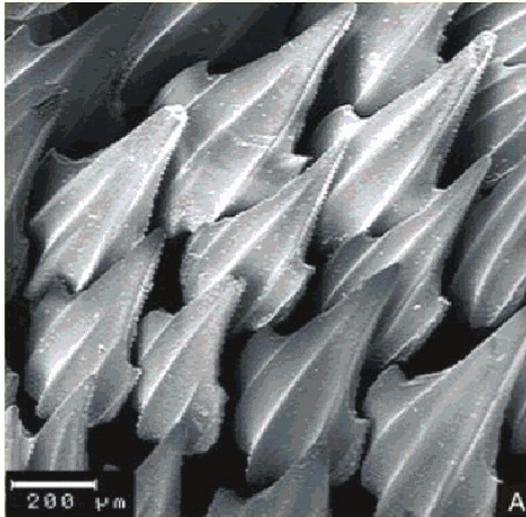


Bild 2.3: Haihaut unter dem Mikroskop [LK04]

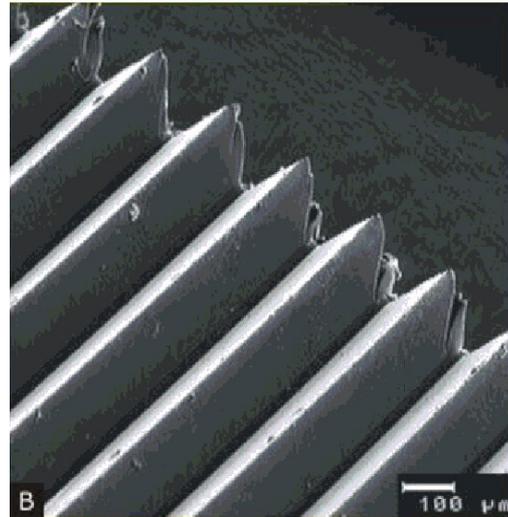


Bild 2.4: Technische Nachbildung [LK04]

Die Mikrostrukturierung der Haifischhaut wurde erstmalig durch REIF [Rei81] beschrieben. Die Vermutung, die in Strömungsrichtung liegenden Rippen würden die turbulente Wandreibung herabsetzen, wurde experimentell bestätigt [BHR85; Bec98]. Das Prinzip wurde zunächst auf Folie übertragen. Mit diesen Folien konnten beliebige technische Oberflächen beklebt werden, deren Reibungswiderstand sich auf diese Weise tatsächlich spürbar reduzieren ließ<sup>7</sup>. BERCHERT errechnet beispielsweise, dass sich durch den Einsatz der Folien der Kerosinverbrauch des Airbus A 320 drastisch vermindern lässt [Bec98; Nac97, S. 35 ff.]. Trotz der viel versprechenden Testergebnisse wird die Folie bei Airbus bislang nicht serienmäßig eingesetzt [Pat05]. Offensichtlich werden die Vorteile der Reibungsreduzierung durch das zusätzliche Gewicht der Folien nahe zu vollständig kompensiert.

### 2.2.3 Beispiel: Unterwasser-Modem

In der Informationstechnik werden für die Übertragung von Signalen in der Regel Wellen genutzt, die entweder optischer, elektromagnetischer oder akustischer Natur sind. Sollen Signale unter Wasser gesendet und empfangen werden, so wie es z. B. bei der Fernsteuerung von Tauchrobotern der Fall ist, stellt sich das Problem, dass optische und elektromagnetische Wellen im Wasser stark gedämpft werden. Aufgrund dessen lassen sich Signale nur über eine geringe Reichweite übertragen. Die alternative Nutzung akustischer Wellen birgt ebenfalls Probleme, denn aufgrund ihres mechanischen Charakters werden sie z. B. durch die Wasseroberfläche, durch den Grund oder durch Objekte, die sich im Wasser befinden, gebrochen und reflektiert. Es entstehen Interferenzen und Verzerrungen, die letztlich zu einem Signalrauschen führen und so eine zuverlässige Übertragung von Informationen über längere Strecken behindern [Keb00, S. 12 ff.].

<sup>7</sup> Nach [Bec98] wurden im Experiment durch eine trapezförmige Rippenoberfläche die besten Reibbeiwerte erzielt. Ein weiterer Vorteil einer solchen Struktur ist, dass mögliche Risse in Oberfläche besser erkannt werden können.

Trotz dieser signalstörenden Eigenschaften des Wassers gelingt es z. B. Delfinen über mehrere Kilometer hinweg miteinander zu kommunizieren. KEBKAL [Keb00] sieht die Ursache hierfür im Gesang der Tiere. Er fand heraus, dass im Gegensatz zu technischen Anwendungen, wo vorrangig starre Frequenzbänder für die Signalübertragung genutzt werden, Delfine ständig den Frequenzbereich variieren und so die Auslöschung der Signale verhindern. Aus der Analyse ihrer Pfeiflaute gelang es ihm, drei Grundprinzipien abzuleiten. Zur Verbesserung der Unterwasserkommunikation schlägt KEBKAL Folgendes vor [Keb00, S. 29 f.]:

1. Nutzung von Frequenzkanälen, die sich kontinuierlich ändern (fließen) und die über signalinterne Proportionen (wie z. B. definierte Abstände zur Trägerfrequenz) miteinander verknüpft sind.
2. Aufbau einer permanenten Verbindung zwischen Sender und Empfänger über einen signaltechnisch separierbaren Grundton, der als Referenz zu den übrigen Frequenzkomponenten genutzt wird. Dieser Ton ermöglicht das Auffinden der Komponenten und erleichtert ihre Auswertung.
3. Digitale Übertragung von Informationen durch eine geeignete Modulationen der Frequenzkanäle. Die Signale werden in Bitmustern kodiert.

KEBKAL und BANNASCH wiesen im Experiment nach, dass unter Beachtung der obengenannten Grundprinzipien Informationen erfolgreich im Wasser übertragen werden können [KB01; KKB+04]. Mit dem von ihnen entwickelten Unterwasser-Modem gelang es, Daten mit einer Geschwindigkeit von 15 Kilobit pro Sekunde über eine Distanz von 3,5 km zu übertragen [Pat05].

Die Technologie ist vielseitig anwendbar. Neben der bereits erwähnten Fernsteuerung von Tauchrobotern soll das Unterwasser-Modem auch im Tsunami-Warnsystems eingesetzt werden. Des Weiteren ist die Nutzung der Technologie in anderen Bereichen denkbar. So haben Radiosender bislang versucht, dem Problem des Signalrauschens durch eine höhere Sendeleistung entgegenzuwirken. Mit der Frequenzmodulation könnten zukünftig Sender und Empfänger störungsfrei und mit einem relativ geringen Energiebedarf Informationen austauschen [GEO06]. Weitere mögliche Einsatzgebiete sind ebenfalls in der Materialprüfung und in der Medizin zur Früherkennung von Tumoren vorstellbar [Sze05].

### 2.2.4 Beispiel: Anti-G-Anzug

Seit der menschliche Traum vom Fliegen mit den Gleitversuchen von OTTO LILIENTHAL in Erfüllung ging<sup>8</sup>, wurden die Fluggeräte kontinuierlich verbessert. Die Entwicklung des Flugzeuges wurde von

<sup>8</sup> LILIENTHAL war nicht der erste, der Fluggeräte nach dem Prinzip „Schwerer als Luft“ entwickelte. Seine Arbeiten sind vor allem deshalb von besonderer Bedeutung, weil er – im Gegensatz zu seinen Vorgängern – ... Weiter auf Seite 22

Anfang an auch durch militärische Anforderungen geprägt. Für den Luftkampf werden beispielsweise Flugzeuge benötigt, die bei hohen Geschwindigkeiten enge Kurvenflüge erlauben.

Mittlerweile ist die Entwicklung soweit fortgeschritten, dass die Grenzen des Machbaren nicht länger durch die Technik bestimmt werden. Längst ist der Mensch zu einem beschränkenden Faktor geworden, denn durch die hohen Beschleunigungskräfte, die insbesondere bei engen Kurvenflügen und Loopings auf den menschlichen Körper wirken, wird das Gehirn nicht mehr ausreichend durchblutet. Piloten, die hohen G-Kräften ausgesetzt sind, droht der zeitweise Verlust der Sehkraft (Blackouts) und bei extremen Belastungen Bewusstlosigkeit.

Zum Schutz der Piloten werden Druckluftanzüge eingesetzt. Sie erzeugen einen Gegendruck, der verhindern soll, dass das Blut in die Extremitäten gedrückt wird. Die Anzüge werden aktiv gesteuert. Sie können jedoch die Belastungen nicht vollständig kompensieren und sind darüber hinaus reaktionsträge<sup>9</sup> [Mad02].

Große Beschleunigungskräfte sind auch in der Natur zu finden. Libellen sind beispielsweise in der Lage, ihren Körper extrem zu beschleunigen und die Flugrichtung bei hohen Geschwindigkeiten abrupt zu verändern. Dabei wirken auf die Libelle kurzzeitig Kräfte von 30 G [Met03]. REINHARD nahm sich die Flugeigenschaften der Libelle zum Vorbild. Er entwickelte den Prototypen eines Druckanzuges, der die Hydrostatik des Wassers nutzt<sup>10</sup>. Er hatte dabei das Bild eines „mit Blut gefüllten Cockpits“ vor Augen, in dem der Pilot schwimmt „wie das Kind im Mutterleib“<sup>11</sup>. Da sich dies nicht realisieren ließ, entwickelte REINHARD einen mit Wasser gefüllten Anzug. Erfährt der Pilot nun eine hohe Beschleunigung, so verändern die Beschleunigungskräfte auch die Druckverhältnisse im Wasser. Es herrscht ein Gleichgewicht zwischen dem Druck innen und dem Druck außen, mit der Folge, dass die Belastung für den Piloten sinkt. Das System ist selbstregulierend und reagiert ohne Verzögerung.

Während die ersten Prototypen, die REINHARD fertigte, den Piloten noch nahezu vollständig mit Flüssigkeit umhüllten, gelang es durch die Verwendung von vertikalen Kammern die benötigte Wassermenge von anfangs 28 auf 3 Liter zu reduzieren. Zusätzlich wurde in den Anzug ein autonomes System integriert, das eine Ausgasung des Blutes bei Druckverlust in großen Höhen verhindert [Mad02].

---

eine Vielzahl von Gleitflügen absolvierte [Con81, S. 161 ff.].

9 In modernen Kampfflugzeugen kann innerhalb von einer Sekunde eine Beschleunigungskraft von 12 bis 15 G aufgebaut werden. Der Druckaufbau im Anzug hingegen kann bis zu zwei Sekunden dauern [Met03].

10 Es ist anzumerken, dass bereits im Zweiten Weltkrieg Piloten mit wassergefüllten Druckanzügen ausgestattet wurden, um sie gegen die Auswirkungen hoher Beschleunigungskräfte zu schützen. Die Anzüge waren jedoch sehr schwer und ihr Schutz unzureichend. Sie wurden deshalb später durch pneumatische Druckanzüge ersetzt [Ber05].

11 Die Zitate entstammen einem Interview mit Herrn REINHARD, das am 25. Januar 2006 in Glattbrugg (Schweiz) geführt wurde (vgl. Kapitel 2.3.1).

In verschiedenen Publikationen [Mad02; Met03] ist nachzulesen, dass sich REINHARD bei der Entwicklung des G-Anzuges *Libelle* vom anatomischen Aufbau des Insektes inspirieren ließ. Tatsächlich schwimmen die Organe der Libelle in einem Flüssigkeitspolster, in ähnlicher Weise, wie es auch REINHARD in seinem Anzug realisierte. Diese Übereinstimmung ist jedoch nicht das Ergebnis einer systematischen Untersuchung. Vielmehr ist festzustellen, dass REINHARD nach eigenen Angaben erst sehr viel später von diesem Sachverhalt Kenntnis erlangte.

### **2.3 Bionik in der Praxis**

Die bisherigen Ausführungen stellten die Bionik aus theoretischer Sicht dar und zeigten beispielhaft die Ergebnisse bionischer Forschung. Die genannten Beispiele sind typisch für die Bionik. Sie zeigen einerseits, dass Bionik in der Praxis funktionieren kann. Andererseits belegen sie, dass die Entstehung bionischer Produkte oftmals ihren eigenen Wegen folgt.

Im Folgenden wird dieser Frage detaillierter nachgegangen. Es wird dargestellt, wie sich das bionische Arbeiten in der Praxis gestaltet. Ziel ist es, zum einen das hier skizzierte Bild der Bionik abzurunden und zum anderen aus den Erkenntnissen erste Ansätze für eine Unterstützung des bionischen Arbeitens zu generieren.

#### **2.3.1 Vorgehensweise**

In der einleitenden Darstellung der Forschungsmethodik (Kapitel 1.2, S. 5 f.) wurde bereits erwähnt, dass Interviews mit Personen, die an der Entwicklung bionischer Produkte mitwirken, geführt wurden mit dem Ziel, den Entwicklungsprozess bionischer Produkte transparent zu machen. Diese Interviews bilden die Grundlage für diesen Teil der Arbeit. Die Namen möglicher Interviewpartner wurden durch eine Recherche ermittelt. Die Anfrage mit der Bitte um ein Gespräch erfolgte per E-Mail (Anhang A). Lag nach drei bis vier Wochen noch keine Antwort der angefragten Person vor, wurde sie erneut angeschrieben.

Es wurde bereits dargestellt, dass von den 22 angeschriebenen Personen etwa die Hälfte auf die Anfrage reagierte. Die meisten äußerten sich unbestimmt oder lehnten das Interview mit dem Hinweis auf Zeitmangel oder vorhandene Publikationen ab. Letztlich kam mit 4 Personen ein Interview zustande. Dabei handelte es sich um Frau Dr. ANITA ROTH-NEBELSICK vom Institut für Geowissenschaften (IFG) der Universität Tübingen, Herrn ANDREAS REINHARD, Erfinder und Geschäftsführer der Firma *prospective concepts*, Herrn Dr. ROLF LUCHSINGER, damals Mitarbeiter bei *prospective concepts* und heute im Center for Syncergetic Structures der Empa, einer Forschungsinstitution für Materialwissenschaften und Technologie tätig sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. MARTIN LAWERENZ vom Institut für

Thermische Energietechnik (ITE) der Universität Kassel. Die Interviews mit Frau Dr. ROTH-NEBELSICK und Herrn Prof. LAWERENZ wurden telefonisch durchgeführt, die Gespräche mit Herrn REINHARD und Dr. LUCHSINGER hingegen erfolgten während eines Firmenbesuches in Glattbrugg in der Schweiz.

Die genannten Personen wurden gebeten, in erzählender Form von ihrer Arbeit zu berichten und zugleich ihre Sicht auf die Bionik zu schildern. Die Interviews wurden aufgezeichnet und später analysiert. In Vorbereitung der Gespräche wurde ein Fragebogen (Anhang B) erstellt. Er diente während der Interviews als Rahmen und wurde im Wesentlichen genutzt, um den Erzählfluss „anzustoßen“ und um die „Vollständigkeit des Erzählten“ zu gewährleisten. Der Fragebogen wurde auch denjenigen Personen zur Verfügung gestellt, die um die Zusendung eines schriftlichen Fragenkatalogs gebeten hatten.

Die folgenden Ausführungen stützen sich im Wesentlichen auf Aussagen, die aus den individuellen Darstellungen und Berichten der interviewten Personen extrahiert wurden. Sie geben zudem Sichtweisen von verschiedenen hier nicht näher benannten Personen wider, die sich auf Konferenzen und Seminaren in „Pausengesprächen“ zum Thema Bionik äußerten.

### **2.3.2 Biologische Grundlagenforschung**

Der Entwicklung bionischer Produkte geht, wie in Kapitel 2.1.1 dargestellt wurde, eine biologische Grundlagenforschung voraus. Bevor ein biologisches System Anregungen zur Verbesserung eines technischen Systems liefern kann, muss es mit seinen Strukturen und Funktionen vollständig verstanden sein. Die Analyse biologischer Systeme ist jedoch keine triviale Aufgabe. Aufgrund der Multifunktionalität dieser Systeme ist es häufig schwierig, den Strukturen eine bestimmte Funktion zuzuordnen. Oftmals bereitet es bereits Schwierigkeiten, in einem biologischen System eine Funktion als solche zu erkennen. Am Beispiel der Luftwurzeln bestimmter tropischer Pflanzen, wie sie am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen erforscht werden, soll dies verdeutlicht werden. Es ist bekannt, dass die Wurzeln für die Wasseraufnahme der Pflanzen verantwortlich sind. Dieses „Flüssigkeitsmanagement“ der Pflanzen ist auch aus technischer Sicht relevant. Impulse erhofft man sich vor allem für Anwendungen, wo Textilien und Flüssigkeiten interagieren (z. B. bei Filtern oder Schutzkleidungen). Es ist jedoch festzustellen, dass für die Botaniker die genauen Bedingungen der Wasseraufnahme durch die Luftwurzeln bislang von untergeordnetem Interesse waren und dass daher die physikalischen Phänomene, die sich hinter den Gewebestrukturen verbergen, nahezu unerforscht sind. So ist z. B. nur unzureichend geklärt, ob die Wurzeln das Wasser direkt der Atmosphäre entnehmen, ob sie einen Nebel oder tropfbares Wasser benötigen. Ungesichert ist ebenfalls, ob die Wasseraufnahme kontinuierlich erfolgt oder ob die Wurzeln nur in den Regenperioden

Wasser aufnehmen und dieses dann speichern. Bevor das Prinzip der Luftwurzeln für technische Anwendungen genutzt werden kann, muss die biologische Grundlagenforschung Antworten auf diese Fragen liefern und die für die Funktion entscheidende Eigenschaften der biologischen Struktur herausstellen.

Bionik zu betreiben bedeutet immer auch Grundlagenforschung zu betreiben. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass bionisches Arbeiten nicht nur für die Produktentwicklung Vorteile birgt. Nach Ansicht von Frau Dr. ROTH-NEBELSICK können Biologen ebenfalls von der Bionik profitieren, denn die Fragestellungen, die aus der Technik kommen, liefern auch Impulse für die Grundlagenforschung. Der Biologe ist somit nicht nur „Dienstleister“ für den Ingenieur, vielmehr kann er aus der Zusammenarbeit Motivation für die eigene Arbeit schöpfen und seinen Horizont erweitern.

### 2.3.3 Bionisches Arbeiten

Der direkte Dialog von Biologen und Ingenieuren ist noch aus einem weiteren Grund wichtig. Biologen, die ein biologisches System analysieren, erkennen oft nicht, dass das, was sie untersuchen, technisch relevant sein könnte. Die Ursachen hierfür liegen in ihrer fachlich einseitig orientierten Ausbildung<sup>12</sup>. Die Analyse biologischer Systeme erfordert zwar ein gut fundiertes Grundlagenwissen, gleichzeitig ist jedoch auch die Fähigkeit zu interdisziplinären Denken für das bionische Arbeiten unumgänglich.

Die meisten Bioniker kommen heute aus etablierten Studienrichtungen. Sie sind Biologen, Physiker oder (seltener) Ingenieure. Sie haben in einer Zeit studiert, in der Interdisziplinarität noch „kein Thema“ war. Die Motivation, bionisch zu arbeiten und sich in fremde Themen einzudenken, ist in der Regel auf ein persönliches Interesse zurückzuführen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie die Ausbildung zukünftiger Bioniker gestaltet werden kann. Bislang sind Ausbildungsstätten, in denen Bionik gelernt wird, eher selten. Die Ausbildung findet meist in Form von Aufbaukursen im Rahmen etablierter Studiengänge statt<sup>13</sup>. Anhand von Beispielen wird versucht, die zahlreichen „verborgenen“ Verbindungen zwischen Biologie und Technik aufzuzeigen und so die Studenten für die Themen des jeweils anderen Fachgebietes zu sensibilisieren.

Die Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren kann sich vor allem in der Anfangsphase schwierig gestalten. Oft treten Missverständnisse auf, die vor allem daraus resultieren, dass das, was einem Biologen relevant erscheint, für den Ingenieur nicht unbedingt von Interesse ist. Für beide Seiten ist

---

<sup>12</sup> In analoger Weise gilt dies auch für die Ingenieurausbildung.

<sup>13</sup> In dieser Form wird Bionik gegenwärtig an der RWTH Aachen, TU Berlin, TU Darmstadt, Uni Freiburg, FH Heidelberg, TU Ilmenau sowie der Uni Saarbrücken gelernt. Die FH Bremen ist zur Zeit die einzige Einrichtung, an der ein Studiengang Bionik etabliert wurde.

es daher wichtig, sich in die Themen des anderen hineindenken zu können. Die Erfahrung bionisch arbeitender Personen zeigt, dass dieser Prozess gewöhnungsbedürftig ist.

Während der Interviews wurde deutlich, dass der Dialog zwischen Biologen und Ingenieuren nur eine Form des bionischen Arbeitens darstellt. Einige Projekte kommen ohne eine detaillierte Analyse biologischer Systeme aus. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung formvariabler Turbomaschinenschaufeln, an denen am Institut für Thermische Energietechnik der Universität Kassel gearbeitet wird [Mül04]. Die Schaufelblätter von Turbomaschinen haben heute in der Regel eine starre Geometrie. Sie sind auf einen bestimmten Strömungszustand hin ausgelegt. Weichen die Strömungsbedingungen von diesem „Normzustand“ ab (z. B. beim Anfahren der Maschine), kann es zu einer Fehlanströmung und zur Ablösung der Grenzschicht kommen. Die Verluste in der Maschine steigen dann sehr stark an. Bisläng gelingt es nur ungenügend, durch eine Verstellung (Rotation) der Leit-schaufeln einer Fehlanströmung entgegenzuwirken. Ziel der Formanpassung ist es, die Turbinenschaufeln in allen Betriebszuständen optimal anströmen zu können und so den Wirkungsgrad der Maschine zu verbessern.

Bei der Konzeption der formvariablen Schaufeln wurden auch Analogien zu biologischen Systemen genutzt, ohne jedoch diese näher auszuführen. Assoziiert wurden vor allem Systeme, bei denen die Oberfläche durch frei bewegliche, relativ starre Elemente gebildet wird. Beispiele hierfür sind das Federkleid der Vögel oder die Schuppenhaut von Fischen und Reptilien. Bei genauerer Betrachtung zeigte sich jedoch, dass der Ansatz einer fein segmentierten Oberfläche technisch nicht realisierbar ist. Eine detaillierte Untersuchung des biologischen Systems „Federkleid“ war aus diesem Grund nicht notwendig. Problematisch ist vor allem die Anbindung und Haftung der Oberflächenelemente an die innere Struktur. Knicke und Welligkeiten müssen vermieden werden, da diese den Strömungsverlauf negativ beeinflussen. Das Konzept wurde daher an die Randbedingungen der Technik angepasst. Es sieht nun vor, die Verformung der Schaufel durch eine kinematische Kette realisieren, bei der die einzelnen Elemente der Schaufel eine Zwangsbewegung ausführen.

Ein weiterer Lösungsansatz, der entwickelt wurde, ohne ein biologisches System analysieren zu müssen, und der dennoch als „bionisch“ gilt, ist *Tensairity*<sup>14</sup>, ein Prinzip, bei dem eine pneumatische Struktur mit Hilfe von Seilen und eines Druckstabes stabilisiert wird [LPR04]. Formstabilisierung durch Innendruck ist in der Natur auch bei Zellen zu finden. Dennoch spielten derartige Analogien bei der Entwicklung von *Tensairity* nach Aussage von Dr. LUCHSINGER keine Rolle. Eine spätere Recherche sowie eine Diskussion mit Biologen zeigte zudem, dass das Grundprinzip der Stabilisierung, wie es bei *Tensairity* genutzt wird, in der Natur nicht bekannt ist.

---

<sup>14</sup> *Tensairity* ist eine eingetragene Marke der Firma „prospective concepts“. Der Begriff setzt sich aus den Worten *tension*, *air* und *integrity* zusammen.

Die Ausführungen machen deutlich, dass bionisches Arbeiten viele Facetten hat. Es zeigt sich, dass in der Praxis eine klare Abgrenzung von bionischem Arbeiten und einem nicht-bionischen Vorgehen schwierig ist. Nur in einem der untersuchten Projekte arbeiteten Biologen und Ingenieuren gemeinsam an der Entwicklung bionischer Produkte. Bei den anderen Projekten wurden biologische Systeme (wenn überhaupt) auf einer recht abstrakten Ebene für die Ideenfindung genutzt. Expertenwissen war in diesen Fällen nicht notwendig oder konnte im Rahmen einer Recherche beschafft werden.

### 2.3.4 Technische Umsetzung

Die Randbedingungen, die die Entwicklungsmöglichkeiten eines Systems vorgeben, und die für die Realisierung zur Verfügung stehenden Mittel sind in Natur und Technik verschieden. Dies hat Konsequenzen für die technische Umsetzung einer biologisch inspirierten Lösung. Es sind vor allem die Materialien und die feinen Strukturen der Natur, die technisch nicht oder nur mit großen Aufwand hergestellt werden können. Dem Produktentwickler ist es daher oft nicht möglich, sich bei der Lösungsfindung eng an den Lösungen der Natur zu orientieren. Nach Meinung von Dr. LUCHSINGER ist dies auch nicht notwendig. Entscheidend ist nicht, wie die Natur Dinge löst, sondern dass sie sie löst. Diese Erkenntnis allein kann Ansporn für den Produktentwickler sein.

Die interviewten Personen sehen die Bionik vor allem im konzeptionellen Bereich. Bei der Detaillierung des Produktes hingegen sind im Wesentlichen die technischen Notwendigkeiten prozessbestimmend. Für die Entwicklung bionischer Produkte ist es nach Auffassung von Herrn REINHARD oft hinreichend, die Prinzipien des „Öko-Designs“ zu berücksichtigen, wobei die Vorsilbe „Öko“ hier nicht wie im Schrifttum allgemein üblich für Ökologie, sondern für Ökonomie steht. Öko-Design meint in diesem Zusammenhang also Dinge, wie ein optimales Aufwand-Nutzen-Verhältnis, zyklisch ablaufende Prozesse, Vermeiden einer „Funktionsübererfüllung“ und eine dynamische Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen. Orientiert man sich bei der Produktentwicklung an diesen Prinzipien, führt dies nach Ansicht von Herrn REINHARD zu innovativen Produkten. Ähnlichkeiten von biologischen und technischen Systemen sind in der Regel darauf zurückzuführen, dass sie unter den gleichen Gesichtspunkten optimiert wurden.

Vor diesem Hintergrund ist die Konzeption des „Stingrays“, eines ultraleichten Flugzeugs in der Form eines Stachelrochens (vgl. Bild 2.5), das unter Federführung von Herrn REINHARD entstand, keine Überraschung. Seine Form erhielt das Flugzeug aufgrund der physikalischen Randbedingungen. Die Ähnlichkeit zum Rochen spielte während der Entwicklung keine Rolle. Dennoch hat der Stingray bionische Elemente, denn der Startvorgang ist dem der Vögel abgeschaut. Im Gegensatz zu anderen Flugzeugen, die eine relativ lange Startbahn benötigen, startet der Stingray aus dem Stand, indem er sich vom Boden „abstößt“. Als Starthilfe dient ein Teleskop-Stab, der mit Hilfe eines

Druckluftimpulses expandiert wird. Die Anregung hierzu erhielt ANDREAS REINHARD während einer Reise nach Florida, wo er beobachtete, wie sich Flamingos mit einem einzigen Sprung in die Luft erheben.



*Bild 2.5: Leichtflugzeug "Stingray" [SFL+06, S. 58]*

Es wurde oben bereits dargestellt, dass bionisches Arbeiten in der Regel eine parallel ablaufende Grundlagenforschung erfordert. Bionik-Projekte sind daher heute im Wesentlichen Forschungsprojekte. Sie sind, wie viele andere Forschungsprojekte auch, in nicht unerheblichem Maß von staatlichen Fördergeldern abhängig. Zum Teil treten auch Unternehmen und private Investoren als Geldgeber auf. Nach Ansicht von Prof. LAWERENZ steht bei der Förderung oft der kommerzielle Erfolg des Produktes im Vordergrund. Das Ziel einer schnellen Markteinführung wird dabei in aller Regel nicht erreicht. Es steht im Widerspruch zur Realität der Entwicklung bionischer Produkte. Die Notwendigkeit zur Grundlagenforschung führt zu relativ langen Entwicklungszeiten, so dass die Umsetzung in ein Produkt nicht selten mehrere Jahre dauert.

## **2.4 Zusammenfassung**

Dieses Kapitel beleuchtete die Bionik sowohl aus theoretischer als auch aus praktischer Sicht. Dabei wurde einerseits deutlich, dass bionisches Arbeiten durchaus Impulse für die Produktentwicklung liefern kann, andererseits zeigten die Darstellungen, dass dies oft in einer Weise erfolgt, die nicht dem „klassischen“ Bild einer Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren entspricht.

Viele Beiträge im Schrifttum der Bionik postulieren, dass eine verstärkte Nutzung des Lösungspools der Natur bei der Entwicklung von Produkten helfen könne. Oft wird der Eindruck vermittelt, der Weg vom biologischen Vorbild zur technischen Umsetzung sei klar und eindeutig vorgezeichnet und müsse nur beschrrieben werden. In der Praxis zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Bionisches Arbeiten ist in der Regel nur innerhalb geförderter Forschungsprojekte möglich. In den meisten Unternehmen wird Bionik – wenn überhaupt – mit „Abstrichen“ praktiziert. Es scheint schwierig, sie in bestehende Prozesse und Strukturen einzugliedern.

Die Ursachen hierfür sind vor allem in der historischen Entwicklung zu suchen. In der Vergangenheit hatten Biologie und Technik kaum Berührungspunkte. Das Wissen der beiden Fachgebiete entwickelte sich weitestgehend unbeeinflusst voneinander. Aus diesem Grund blieben – wie das Beispiel des Lotus-Effektes zeigt – für die Technik nutzbare Erkenntnisse der Biologie oft unerkannt. Ähnliche Problemstellungen und ähnliche Randbedingungen in Natur und Technik führten dazu, dass in der Technik Lösungen entwickelt wurden (und bis heute entwickelt werden), die in ähnlicher Form auch durch die Natur hervorgebracht wurden. Diese Tatsache zeugt zwar eindrucksvoll von der Fähigkeit des Menschen, Probleme zu lösen; es stellt sich jedoch die Frage, ob die Lösungsfindung nicht durch „einen Blick in die Natur“ hätte beschleunigt werden können.

Im Schrifttum der Bionik wird vielfach darauf hingewiesen, dass die Natur „*keine Blaupausen für die Technik*“ [Nac98a, S. 59] liefert. Die Ausführungen in diesem Kapitel unterstützen die These, dass ein reines Kopieren des natürlichen Vorbildes weder möglich noch sinnvoll ist. Drei Gründe lassen sich hierzu anführen:

1. In der Natur und in der Technik können zwar ähnliche Randbedingungen gefunden werden, diese sind aber nie völlig identisch. Die entstehenden Lösungen können daher ebenfalls nur ähnlich sein; identische Lösungen sind unwahrscheinlich. Es ist einsehbar, dass die Struktur der Haifischhaut nicht unmittelbar genutzt werden kann, um den Reibungswiderstand bei Flugzeugen zu reduzieren. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Wasser und Luft verhindern dies.
2. Natürliche und technische Lösungen unterscheiden sich in den Funktionen, die sie erfüllen. So dient das Unterwasser-Modem der Übertragung von Daten, nicht der Kommunikation mit Delfinen. Diese Unterschiede werden auch in der Ausprägung der Lösung deutlich.
3. Der Natur und der Technik stehen unterschiedliche Möglichkeiten der Realisierung zur Verfügung. Dies äußert sich z. B. in den verwendeten Materialien oder in der Art der Entstehung einer Lösung. So gelten die Gesetzmäßigkeiten des biologischen Wachstums, wie sie bei der Libelle zu beobachten sind, nicht für die Entwicklung und Fertigung von Druckanzügen.

Zweifelsfrei lassen sich zwischen biologischen und technischen Systemen Analogien finden. Die Suche nach relevanten Naturvorbildern scheint jedoch nicht trivial. Zudem bedarf es erheblicher Anstrengungen, die Anregungen aus dem Naturvorbild in eine technische Lösung zu übertragen. Unter Umständen gelingt dieser Schritt nicht, wie es der Einsatz von Rippenfolien bei Flugzeugen zeigt.

Vor diesem Hintergrund erscheint es verständlich, dass sich die Bionik mit ihrer Denk- und Arbeitsweise bislang nicht in Unternehmen etablieren konnte. Für den Produktentwickler steht die schnelle

Lösungsfindung im Vordergrund. Analogien zu biologischen Systemen sind dabei nur ein Werkzeug. Sie werden von ihm nur dann genutzt, wenn sie zur Lösungsfindung beitragen können. Hierzu ist es entscheidend, dem Produktentwickler Analogien aufzuzeigen und ihm zu verdeutlichen, welche Teile der Analogie relevant sind, und welche vernachlässigt werden können. Bevor diese Fragestellungen weiterführend diskutiert und Lösungsansätze aufgezeigt werden, wird im Folgenden zunächst der Produktentwicklungsprozess näher beleuchtet. Ziel ist es dabei, die Arbeitsweise des Produktentwicklers zu skizzieren und in einem kurzen Überblick die von ihm genutzten Methoden und Werkzeuge darzustellen.

*Prüfet und behaltet das Beste.*

*HERMANN GRUSON*

### 3 Produktentwicklung im Überblick

Seit jeher erschafft der Mensch Produkte. Am Anfang stand vermutlich der Gebrauch von umherliegenden Ästen und Steinen. Es lässt sich darüber streiten, ob ein Gegenstand bereits durch eine gezielte Nutzung zu einem *Produkt*<sup>1</sup> wird. Kulturhistorisch wird „*in der systematischen Hervorbringung von Dingen, die in der Natur so nicht vorhanden sind*“ [BC06, S. 5], ein entscheidender Schritt der Menschheitsentwicklung gesehen. Erst als der Mensch begann, die ihm zur Verfügung stehenden Materialien *planmäßig* umzugestalten, kann von einer *Produktentwicklung* gesprochen werden<sup>2</sup>.

Die Geschichte der Produktentwicklung scheint so alt wie die Menschheit selbst zu sein. Um so erstaunlicher ist es, dass ihr Wesen lange Zeit unerforscht blieb. Zwar standen bereits in der Antike Themen wie das menschliche Denken und Handeln im Zentrum philosophischer Überlegungen [Fie78], doch erst im letzten Jahrhundert wurde mit einer systematischen Untersuchung des Produktentwicklungsprozesses begonnen. Ziel dieser Forschungsaktivitäten war und ist es, die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Produkten zu beschreiben, um darauf aufbauend Methoden und Werkzeuge für ihre Unterstützung bereitzustellen.

Der Ansatz von WÖGERBAUER [Wög43] gilt als grundlegend für die Entwicklung einer Konstruktionsmethodik. Die von ihm beschriebene iterative Vorgehensweise aus den Schritten *Prüfen*, *Bewerten*, *Überarbeiten* wurde von anderen Autoren [Kes54; Han68] aufgegriffen und erweitert. Heute existiert eine Vielzahl von Beschreibungen, Methoden und Werkzeugen, die im Umfeld der Produktentwicklung angesiedelt sind. Die Anzahl der publizierten Ansätze wächst exponentiell, so dass es

1 Der Begriff *Produkt* hat seinen Ursprung im Lateinischen und bedeutet soviel wie „Erzeugnis“, „Ertrag“, „Folge“ oder „Ergebnis“ [Dud04]. Er umfasst sowohl materielle als auch immaterielle Erzeugnisse, die einen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess durchlaufen haben [VDI2221, S. 41].

2 In der Natur sind zahlreiche Produkte zu finden, die auf das Wirken von Tieren zurückzuführen sind. Als Beispiel seien hier Spinnennetze, Vogelnester und Bienenstöcke genannt. Ob die Entstehung dieser Produkte auf einer gezielten Planung basiert, darf in vielen Fällen bezweifelt werden.

zunehmend schwierig wird, die Entwicklung zu verfolgen und signifikante Trends aufzudecken [Hor01; Mar03]. Hinzu kommt, dass die Ansätze sich nicht konkurrierend gegenüberstehen, sondern dass es sich um sich ergänzende Sichtweisen und Darstellungen mit unterschiedlichem Fokus handelt [Cle05]. Neben den Obengenannten stammen wegweisenden Arbeiten u. a. von RUGENSTEIN [Rug74], KOLLER [Kol85], SUH [Suh90], PUGH [Pug90], HUBKA & EDER [HE92], PAHL & BEITZ [PB93] und ULRICH & EPPINGER [UE95]. Nach CLEMENT [Cle05, S. 70] haben in der Praxis vor allem die folgenden Konstruktionsmethodiken Verbreitung gefunden:

- Konstruieren mit Konstruktionskatalogen nach ROTH [Rot94]
- Allgemeines Vorgehensmodell des Konstruierens nach HUBKA [HE92]
- Integrierte Produktentwicklung nach EHRENSPIEL [Ehr95]
- Konstruktionslehre nach PAHL & BEITZ [PB93]
- Integrierte Produktentwicklung nach ANDREASEN & HEIN [AH87]
- Taxonomy for Mechanical Design nach ULLMAN [Ull97]
- Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme gemäß den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 [VDI2221; VDI2222]
- Widerspruchsorientierte Produktentwicklung nach ALTSCHULLER [Alt84], LINDE & HILL [LH93]

Eine ausführliche Darstellung der oben aufgeführten Ansätze und eine Würdigung aktueller Forschungsaktivitäten im Bereich der Konstruktionswissenschaft soll an dieser Stelle nicht erfolgen. Der interessierte Leser sei hierzu auf die obengenannten Werke oder auf Publikationen in Konferenzbänden verwiesen. Zusammenfassende Darstellungen sind auch bei WEGNER [Weg99] und AHRENDT [Ahr00] zu finden. Ziel dieses Kapitels ist es, dem Leser einen Einstieg in die Thematik der Produktentwicklung zu ermöglichen. Gleichzeitig soll der Stellenwert der Bionik in der Produktentwicklung näher beleuchtet werden.

Zunächst wird in diesem Kapitel die generelle Vorgehensweise des Produktentwicklers anhand ausgewählter Vorgehensmodelle skizziert. Die Beschreibung der Vorgehensweise bei der Produktentwicklung beschränkt sich auf eine kurze Darstellung der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221], die als Kompromiss der Sichtweisen verschiedener Konstruktionsschulen angesehen werden kann. Darüber hinaus werden die Ansätze von VAJNA & BERCSEY [VB94] und LINDEMANN [Lin03] als Vertreter der jüngeren Konstruktionsforschung dargestellt. Daran anschließend werden ausgewählte Aspekte der Produktentwicklung herausgestellt. Die Darstellung erfolgt mit dem Ziel, Schnittstellen zwischen Produktentwicklung und Bionik und damit mögliche Anknüpfungspunkte aufzuzeigen.

### 3.1 Produktentwicklungsmethodik

Die Entwicklung von Werkzeugen und Methoden zur Unterstützung des Konstrukteurs setzt voraus, dass der Prozess der Produktentwicklung in hinreichender Form verstanden und beschrieben wurde. Im Folgenden sollen daher wichtige Beschreibungen des Produktentwicklungsprozesses vorgestellt und diskutiert werden.

#### 3.1.1 VDI-Richtlinie 2221

Die VDI-Richtlinie 2221 bezeichnet eine „allgemein anwendbare Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ [VDI2221, S. 2]. Sie basiert auf dem allgemeinen Problemlösungsprozess und überträgt ihn auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess. Ziel ist es, den Aufwand zur Erstellung marktfähiger Produkte durch eine geeignete inhaltliche und organisatorische Strukturierung des Ablaufes sowie durch eine optimale Ausnutzung der Möglichkeiten der Datenverarbeitung zu reduzieren.

Der Konstruktionsprozess wird in die vier Hauptphasen *Planen*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten* unterteilt [PB93, S. 80]. Die Phasen werden im Wesentlichen nacheinander durchlaufen, wobei festzustellen ist, dass sich Sprünge im Ablauf nicht vermeiden lassen. Eine klare Abgrenzung der einzelnen Phasen ist daher nur schwer möglich. Die Hauptphasen beinhalten Hauptarbeitsschritte, die jeweils mit einem „bedeutsamen Arbeitsergebnis“ [PB93, S. 80] abschließen. Die VDI-Richtlinie 2221 nennt die im Bild 3.1 dargestellten sieben Hauptarbeitsschritte.

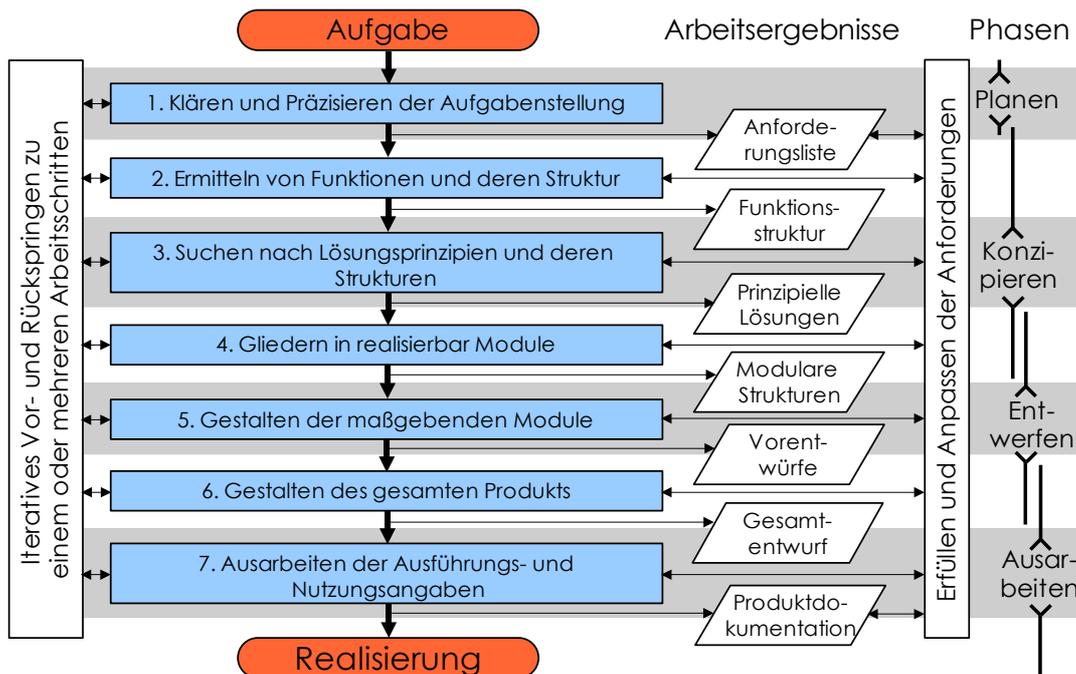


Bild 3.1: Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]

Die obengenannten Sprünge und Iterationen zwischen den Hauptarbeitsschritten sind kennzeichnend für den Produktentwicklungsprozess. Sie gehören zur methodischen Arbeit [Ehr95, S. 68]. Da die VDI-Richtlinie die Produktentwicklung in erster Linie als sequentiellen Prozess abbildet und zudem kaum Aussagen darüber trifft, wann und wie die Sprünge auszuführen sind, wurde sie als oft zu starr und wenig flexibel kritisiert [Pah95; BVM01; Ott01; JRG+02; Mar03].

Neben einer Beschreibung der Vorgehensweise beim Konstruieren stellt die VDI-Richtlinie einen Methodenkatalog zur Verfügung [VDI2221, S. 32 ff.]. Dem Anwender werden zu jedem Arbeitsschritt geeignete Methoden vorgeschlagen. In der Praxis wird jedoch nur ein relativ kleiner Teil der Methoden angewandt. Generell scheint hier eine methodische Vorgehensweise beim Konstruieren wenig akzeptiert [Gün99; Lau01]. EHRENSPIEL sieht den Grund hierfür u. a. darin, dass eine „*objektive Einstufung der Wirksamkeit und des Lern- und Anwendungsaufwandes alternativer Methoden*“ [Ehr95, S. 287] fehlt. Er stellt jedoch fest, dass eine Produktentwicklung ohne Methoden nicht denkbar ist. Methoden werden immer bewusst oder unbewusst angewendet. Die Entscheidung für oder gegen eine Methode ist häufig subjektiver Natur. Methoden werden vor allem dann angewendet, wenn das Ziel *nur* mit Hilfe der Methode erreicht werden kann.

### 3.1.2 Alternative Beschreibungen der Vorgehensweise

Verschiedene Autoren haben alternative Beschreibungen des Produktentwicklungsprozesses vorgeschlagen, mit denen sich die Dynamik des Prozesses besser darstellen lässt. Beispielhaft seien im Folgenden die Ansätze von VAJNA & BERCSEY [VB94] und LINDEMANN [Lin03] vorgestellt.

Mit der *Autogenetischen Konstruktionstheorie* schlagen VAJNA ET AL. [VB94; VCJ+05] einen evolutionsorientierten Ansatz zur Modellierung und Unterstützung des Konstruktionsprozesses vor. Das Modell basiert auf dem Grundgedanken, dass es für ein neues Produkt immer Vorbildobjekte gibt [Weg99, S. 90]. Solche Vorbilder können zum Beispiel vorhandene Lösungen (oder Teile von ihnen) sein. Auch Objekte aus nicht technischen Bereichen, wie z. B. aus der Natur, können als Vorbild für ein neues Produkt dienen. Diese Vorbilder werden analog zur natürlichen Evolution, wo eine Generation die vorhergehende ablöst, mehr oder weniger stark variiert, um den sich ständig ändernden Anforderungen und den neuen Möglichkeiten des Umfeldes gerecht zu werden.

Neue Lösungen entstehen in einem iterativen Prozess, der sich durch die Elemente *Selektion*, *Rekombination*, *Mutation* und *Bewertung* beschreiben lässt. Die Ergebnisse eines Arbeitsschrittes dienen dabei als Ausgangslösungen für den nachfolgenden Schritt [Weg99, S. 95 f.]. Nach CLEMENT stellt die *Autogenetische Konstruktionstheorie* den Rahmen für die Entwicklung eines technischen Systems zur Verfügung, überlässt die konkrete Vorgehensweise jedoch dem Entwickler [Cle05, S. 83].

LINDEMANN schlägt mit dem *Münchener Vorgehensmodell* [Lin03] ebenfalls einen Ansatz vor, mit dem die typischen Abläufe innerhalb des Produktentwicklungsprozesses und die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen des Prozesses erklärt werden. Das Modell ist darüber hinaus ein Instrument für die Planung der Aktivitäten in der Produktentwicklung. Es beschreibt keine starre Vorgehensweise, sondern zeigt dem Anwender verschiedene Handlungsalternativen auf, zwischen denen er wählen kann.

Das *Münchener Vorgehensmodell* besteht aus sieben Elementen, die netzwerkartig miteinander verbunden sind (Bild 3.2). Zwischen diesen Elementen wechselt der Produktentwickler in Abhängigkeit von der gegenwärtigen Situation oder dem Status des übergeordneten Prozesses hin und her. Durch den Wechsel lassen sich sowohl die Iterationen, die während der Bearbeitung eines Problems auftreten, als auch der Wechsel zu über- oder untergeordneten Problemfeldern beschreiben.

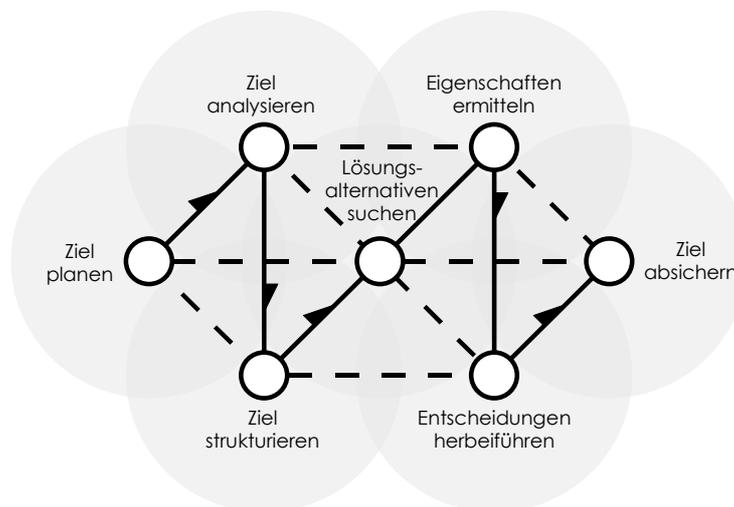


Bild 3.2: Münchener Vorgehensmodell [Lin03]

Jedem Element ist ein Satz Methoden zugeordnet, die der Produktentwickler zur Lösung der Aufgabe heranziehen kann. Für jede Methode sind ihr *Zweck*, die *Situation*, in der sie angewendet werden kann, das *Vorgehen*, sowie ihre *Wirkung und Nebenwirkungen* beschrieben. Zur Auswahl der geeigneten Methode stellt LINDEMANN einen Fragenkatalog bereit, der den Produktentwickler bei seiner Entscheidung unterstützt.

Sowohl die *Autogenetische Konstruktionstheorie* als auch das *Münchener Vorgehensmodell* stellen keinen „Bruch“ mit der VDI-Richtlinie dar. Die Denkweisen, die diesen Ansätzen zugrunde liegen, entstanden (wie auch die Richtlinie des VDI) aus der Beobachtung real ablaufender Entwicklungsprozesse. Die genannten Modelle übernehmen die in der VDI-Richtlinie vorgeschlagene Unterteilung des Produktentwicklungsprozesses in Hauptarbeitsschritte unverändert. Sie beschreiben die Produktentwicklung jedoch aus einer neuen Perspektive und setzen bei der Darstellung des Prozesses andere Schwerpunkte. Während die VDI-Richtlinie allgemein von einem iterativen Vor- und Rückspringen

zu einem oder mehreren Arbeitsschritten spricht, ergänzen die Modelle die Richtlinie um ein Verständnis vom dem, was innerhalb der Hauptarbeitsschritte passiert und zeigen Möglichkeiten auf, an welchen Stellen ein Wechsel zwischen ihnen möglich und sinnvoll ist. Sie verdeutlichen, dass das Aufgabenspektrum eines Produktentwicklers selbständlicher Natur ist. Das Münchner Vorgehensmodell nutzt dabei zur Beschreibung ein Netzwerk von Grundelementen, die in jedem Hauptarbeitsschritt identifiziert werden können. Die Autogenetische Konstruktionstheorie hingegen greift zur Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses Analogien zu den Operatoren evolutionärer Entwicklungsvorgänge auf.

### 3.1.3 Weitere Aspekte der Produktentwicklung

Neben der Konstruktionsmethodik beschäftigt sich die Forschung im Rahmen der Produktentwicklung mit einer Vielzahl weiterer Aspekte. Viele der Forschungsthemen haben sich, wie ANDREASEN feststellt, in den vergangenen Jahren geändert. Auf der anderen Seite gibt es einige Kernthemen, die für die Forschung offensichtlich von dauerhaftem Interesse sind [And01, S. 3]. Seine Aussagen basieren auf einer Analyse von Publikationen, die in den letzten Jahren auf ICED-Konferenzen<sup>3</sup> veröffentlicht wurden. ANDREASEN identifiziert vier Zeitperioden, die die Forschungsthemen im Bereich der Produktentwicklung und ihre Entwicklung charakterisieren [And01, S. 9]:

- Für die erste Periode sind Publikationen charakteristisch, die basierend auf Erfahrungen aus der Praxis und anhand von Fallstudien das konstruktionsmethodische Vorgehen darstellen. Eine konstruktionsmethodische Forschung findet nur vereinzelt statt, so dass sich die wissenschaftlichen Grundlagen und die Forschungsmethodik nur allmählich entwickeln.
- In der zweiten Phase ist der gesamte Produktentwicklungsprozess ein zentrales Thema in den Publikationen. Es werden die verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus betrachtet. Eine Vielzahl der Veröffentlichungen beschäftigt sich mit der Fertigung und Montage von Produkten und den damit verbundenen Kosten. Im Fokus stehen auch DfX und die Verkürzung der Produktentwicklungszeit.
- Die dritte Periode ist gekennzeichnet durch Veröffentlichungen, die sich mit dem Management von Produktentwicklungsaktivitäten beschäftigen. Das Team als Träger der Entwicklungsleistung steht im Vordergrund der Betrachtungen. Der Entwicklungsprozess wird unter einer Vielzahl verschiedener Sichtweisen betrachtet und mit Hilfe empirischer Methoden untersucht.
- Die vierte Phase, die bis zur Gegenwart andauert, ist durch eine große Vielfalt von Ansätzen gekennzeichnet. Sie umfassen z. B. Untersuchungen, die dem Verständnis der Handlungsweise

---

3 ICED – International Conference on Engineering Design

von Konstrukteuren dienen, beschäftigen sich jedoch auch mit Computeranwendungen im Entwicklungsprozess. Im Unterschied zur früheren Perioden steht das wissenschaftliche Vorgehen und das interdisziplinäre Arbeiten im Vordergrund. ANDREASEN stellt jedoch fest, dass der Ausbau der theoretischen Grundlagen der Produktentwicklung in dieser Phase vernachlässigt wird.

Einen Eindruck von der Vielfalt aktueller Forschungsthemen im Bereich der Produktentwicklung vermitteln auch LOWE ET AL. [LMS+01]. Sie analysierten die Publikationen der ICED-Konferenz im Jahr 1999 und der Konferenz TMCE<sup>4</sup> im Jahr 2000 und stellen daraus eine Liste mit Schlüsselthemen zusammen, die zur Klassifizierung zukünftiger Konferenzbeiträge genutzt werden kann. Ihrer Ansicht nach lassen sich die Beiträge in die folgenden Themen einordnen:

- Design Theory and Research Methodology
- Creativity and Innovation
- Product and System Modelling
- Design Methods, Techniques and Tools
- Knowledge and Information Management
- Organisation and Management of Design
- Design Education
- Engineering Design in Industry
- Current Issues

HORVÁTH gliedert die Forschungsaktivitäten im Bereich der Produktentwicklung in „*human assets*“, „*design knowledge*“, „*knowledge about artifacts*“, „*knowledge about processes*“, „*design philosophy*“, „*design theory*“, „*design methodology*“, „*design technology*“ und „*design application*“ [Hor01]. Er ordnet diese Aspekte in einem „*reasoning model*“, in dem er zeigt, welche Ziele mit den Forschungsaktivitäten verfolgt werden und wie die Aspekte miteinander zusammenhängen.

Die Beiträge zu den menschlichen Aspekten („*human assets*“) in der Produktentwicklung umfassen alle Facetten, bei denen Menschen mit Produkten in Berührung kommen. Sie schließen Untersuchungen zur Entwicklung, Herstellung und Nutzung von Produkten ein. Die Forschungsaktivitäten beinhalten somit z. B. Studien zum Problemlöseverhalten und zum Wissenstransfer zwischen Produktentwicklern. Sie behandeln Gesichtspunkte wie Ergonomie, Ästhetik und Marketing. Die Ergebnisse dieser Forschungen bilden die Grundlage für alle anderen Forschungsaktivitäten.

Die Forschung im Bereich des „*design knowledge*“ befasst sich mit Fragestellungen nach dem Ursprung und der Natur des Produktentwicklungswissens, seinen Inhalten und seiner Merkmale, sowie mit der Möglichkeiten, dieses Wissen aufzudecken. Die Erkenntnisse sind z. B. relevant für die Entwicklung von Wissensstrukturen und deren Einbindung in Unterstützungssysteme. Sie fließen aber auch in die Entwicklung neuer Ausbildungskonzepte und Lehrmethoden ein.

---

4 TMCE – Tools and Methods of Competitive Engineering

Nach HORVÁTH lässt sich das Wissen der Produktentwicklung in Produkt- und Prozesswissen unterscheiden („*knowledge about artifacts*“ und „*knowledge about processes*“) [Hor01]. Bei Ersterem wird das Zusammenspiel von Stoff, Energie und Information in Produkten untersucht. Die Forschungstätigkeiten beinhalten z. B. Arbeiten zu Konstruktionsprinzipien, dem Einsatz von Materialien und Strukturen, und sie beziehen Gesichtspunkte wie Produktverhalten, Nutzung und Entsorgung ein. Neben dem Produktwissen ist auch das Prozesswissen für die Forschung von Interesse. Dabei spielen nicht nur die Prozesse eine Rolle, die zur Entstehung eines Produktes führen, sondern auch solche, die ein bestehendes Produkt begleiten. Die Forschungsaktivitäten umfassen alle Aspekte des Produktlebenszyklus. Die Verteilung von Informationen sowie der Umgang mit Komplexität stellen hierbei eine besondere Herausforderung dar.

Ziel der Forschungen in den Bereichen „*design philosophy*“ und „*design theory*“ ist es, das Wesen der Produktentwicklung zu beschreiben. Hier werden die theoretischen Grundlagen gelegt, die für ein Verständnis notwendig sind. Während im Rahmen der „*design theory*“ versucht wird, das Wissen der Produktentwicklung mit der Praxis zu verknüpfen, werden im Bereich der „*design philosophy*“ auf der Basis logischer Argumente Hypothesen zum Wesen der Produktentwicklung formuliert, die mehr auf Vermutungen als auf Beobachtungen basieren. Weitere wichtige Fragestellungen, die in diesem Zusammenhang diskutiert werden, beschäftigen sich mit der Technologiefolgenabschätzung, mit gesellschaftlichen, kulturellen und moralischen Aspekten [Rop98].

Die Entwicklung von Konstruktionsmethodiken („*design methodology*“) sowie unterstützender Werkzeuge („*design technology*“) stellt gleichfalls einen wichtigen Zweig der Forschungsaktivitäten im Rahmen der Produktentwicklung dar. Hierzu gehören z. B. Werkzeuge und Methoden, die die Lösungsfindung unterstützen und solche, die helfen, Lösungsvorschläge darzustellen, zu analysieren, zu simulieren und zu bewerten. Wichtig sind ebenfalls Werkzeuge und Methoden, die die Kommunikation und den Wissenstransfer im Entwicklungsteam unterstützen.

In den Forschungsbeiträgen zu „*design application*“ werden die obengenannten Aspekte zusammengeführt und erweitert. Zumeist beschäftigen sich die Arbeiten in diesem Bereich mit der Darstellung konkreter Problemstellungen und Ansätzen zu deren Lösung. Die Beiträge sind durch eine hohe Praxisnähe gekennzeichnet. Sie werden daher auch genutzt, um bestehende Theorien und Sichtweisen zu validieren.

Die Ausführung oben zeigen, dass die Forschungsthemen der Produktentwicklung vielschichtig sind und dass die Aspekte in vielfältiger Weise miteinander verknüpft sind. Im Folgenden sollen daher diejenigen Aspekte herausgegriffen und näher diskutiert werden, die konkret auf die Unterstützung der Tätigkeit des Produktentwicklers zielen.

## 3.2 Strategien, Methoden, Werkzeuge und Hilfsmittel

Zur Unterstützung des Produktentwicklers werden im Schrifttum eine Reihe von *Strategien, Methoden, Werkzeugen* und *Hilfsmitteln* diskutiert. Bevor im Folgenden in einem kurzen Abriss die Möglichkeiten einer Unterstützung dargestellt werden, sollen diese Begriffe zunächst erläutert werden. Nach EHRENSPIEL lassen sie sich wie folgt voneinander abgrenzen [Ehr03, S. 134]:

- Eine **Strategie** bezeichnet ein „*ein längerfristig ausgerichtetes planvolles Anstreben einer vorteilhaften Lage oder eines Ziels*“ [WIK06d]. In der Produktentwicklung versteht man unter einer Strategie eine „*flexible Leitidee*“ [Ehr03, S. 134]. Strategien können sich auf das zu entwickelnde Produkt („möglichst wenig Teile verwenden“) oder auf den Entstehungsprozess („das Wichtige zuerst bearbeiten“) beziehen. Sie beeinflussen das Denken des Produktentwicklers und geben ihm eine Handlungsrichtung vor.
- **Methoden** beschreiben ein „*planmäßiges und folgerichtiges Vorgehen*“ [Dud04]. Es handelt sich dabei um eine „*Menge von Vorschriften, deren Ausführung den Vollzug einer als zweckmäßig erachteten Operationsfolge unter gegebenen Umständen sicherstellt*“ [Mül90 zitiert nach GEK01, S. 219]. Nach EHRENSPIEL lassen sie sich Organisations- und Sachmethoden unterscheiden. Während Organisationsmethoden der Gestaltung von Prozessen dienen, unterstützen Sachmethoden den Produktentwickler bei der Erfüllung sachlicher Aufgaben, wie z. B. dem Erstellen eines Dokumentes oder eines Objektes [Ehr95, S. 284].
- Unter **Werkzeugen** werden in der Produktentwicklung konkrete Teilmethoden verstanden. Hierzu zählen z. B. rechnerunterstützte Werkzeuge wie CAD<sup>5</sup> und FEM<sup>6</sup>.
- **Hilfsmittel** sind körperliche Objekte, die in der Produktentwicklung eingesetzt werden. Computer, Rapid-Prototyping-Maschinen und Metaplan-Tafeln sind Beispiele hierfür.

Im Folgenden werden die Unterstützungsmöglichkeiten auszugsweise skizziert. Gleichzeitig wird dabei untersucht, welche Schnittpunkte sich mit der Bionik ergeben. Diese werden in nachfolgenden Kapiteln der Arbeit aufgegriffen und detaillierter diskutiert.

### 3.2.1 Strategien

Strategien werden in nahezu allen Lebensbereichen bewusst oder unbewusst angewendet. Sie zielen auf den richtigen Einsatz bestimmter Mittel in Zeit und Raum [WIK06d]. In der Produktentwicklung bezeichnen Strategien flexible Leitideen. Sie geben die Arbeitsrichtung vor, um eine Zielstellung zu erreichen. Strategien setzen die Fähigkeit zu planendem Handeln voraus. Daher kann davon ausge-

---

<sup>5</sup> CAD – Computer Aided Design

<sup>6</sup> FEM – Finite Elemente Methode Schriftarten und Qualität in Bildern prüfen

gangen werden, dass strategisches Planen und Handeln in der Natur den höher entwickelten Lebensformen vorbehalten ist.

Dennoch erwecken biologische Systeme oft den Eindruck, ihr Verhalten basiere auf einer verborgenen Strategie. So errichten z. B. viele Termitenarten brettförmige Bauten, die sie nach dem Lauf der Sonne ausrichten. Morgens und abends fallen die Strahlen auf die breite Seite des Baus, um diesen schnell aufzuwärmen bzw. um Energie für die Nacht zu speichern; der brennenden Mittags-sonne hingegen ist die schmale Seite des Baus zugewandt [Nac97, S. 52]. Nach heutigem Erkenntnisstand beruhen solche „cleveren Lösungen“ im Wesentlichen auf dem Prinzip der Selbstorganisation [Rei92]. Sie sind das Ergebnis eines seit Jahrmillionen andauernden zufallsgesteuerten Entwicklungsprozesses, der Evolution [Dar04]. Die Evolution kommt einem Optimierungsprozess gleich, dessen Ziel sich fortwährend ändert [VCJ+05]. Die Veränderung und Anpassung basiert im Wesentlichen auf den Operatoren Selektion, Replikation, Mutation und Rekombination. Dieser Prozess führte in der Natur letztlich zur Entwicklung hoch komplexer Systemgefüge.

Durch die Analyse natürlicher Systeme lassen sich vielfältige Erkenntnisse gewinnen. Sie können als Strategien formuliert werden und so zur Gestaltung und Verbesserung technischer Systeme beitragen. Verschiedene Autoren [Nac98b; Gle98a; KT02] haben solche Prinzipien und Grundregeln beschrieben. Im Kapitel 6.2.4 werden sie dargestellt und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die Produktentwicklung untersucht.

### 3.2.2 Sachmethoden

Während einer Produktentwicklung erfüllt der Konstrukteur eine Vielzahl von Aufgaben. Dabei kann er auf eine Reihe von Methoden zurückgreifen. Sie sind zumeist in Form von Katalogen [Ehr95, S. 661 ff.; PB93, S. 733 ff.] beschrieben. Als Ordnungskriterien werden in der Regel die Hauptaufgaben, die während der Produktentwicklung durchlaufen werden (Bild 3.1 auf Seite 33), genutzt. So ist z. B. die Anforderungsliste ein geeignetes Mittel zum Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Daneben kommen auch Literaturrecherchen, Marktanalysen und die Analyse bekannter Systeme zum Einsatz. Die Kombination von Wirkprinzipien wird durch Bewertungsmethoden, Auswahlverfahren und die Verwendung von Ordnungsschemata unterstützt.

Die Methodenkataloge führen auch die Bionik auf. Sie wird sowohl als Methode in der Produktplanung vorgeschlagen [Ehr95, S. 664] als auch direkt den Kreativitätstechniken [VDI2221, S. 35] zugeordnet. EHRENSPIEL sieht die Bionik als Sonderfall der Synektik<sup>7</sup> [Ehr95, S. 352]. Eine klare Abgrenzung scheint aus mehreren Gründen schwierig. Zum einen überlappen sich Fragestellungen z. B.

---

<sup>7</sup> Hierbei handelt es sich um eine Methode der Ideenfindung, die gezielt nach Analogien aus nichttechnischen Bereichen sucht und diese zur Lösung der gestellten Aufgabe nutzt.

bezüglich der „Klärung der Aufgabenstellung“ und dem „Finden von Produktideen“, so dass eine Zuordnung erschwert wird. Zum anderen liegt eine Schwierigkeit darin, dass im Schrifttum kein einheitliches Verständnis der Methode „Bionik“ vorherrscht. Auf der einen Seite wird bereits die Analyse biologischer Systeme im Rahmen von Kreativitätstechniken als Bionik verstanden. Auf der anderen Seite wird argumentiert, die Bionik stelle *„im eigentlichen Sinne keine Kreativitätsmethode dar, da die Lösungssuche im Rahmen von längerfristig angelegten Forschungsprojekten von Fachleuten verschiedener Gebiete durchgeführt wird“* [AS06, S. 2].

Die Methoden sind als Netzwerk strukturiert. Sie bauen zum Teil hierarchisch aufeinander auf und „nutzen sich gegenseitig“ [Lin03]. In diesem Sinne ist die Methode „Bionik“ mit Kreativitätstechniken, Literaturrecherchen, Versuche und Messungen, Kommunikationsmethoden u. v. a. m. verbunden. Der bionisch arbeitende Produktentwickler kann daher die mit der Bionik verknüpften Methoden nutzen, wenn ihm dies bei bestimmten Unteraufgaben hilfreich erscheint. Auf der anderen Seite ist es auch denkbar, dass z. B. im Rahmen von Kreativitätstechniken auf die Methode „Bionik“ zurückgegriffen wird, um Ideen für neuartige Lösungsansätze zu generieren.

### 3.2.3 Organisationsmethoden

Organisationsmethoden spannen den Handlungsrahmen auf, in dem eine Produktentwicklung stattfindet. Zu dieser Art Methoden zählen z. B. Teamarbeit, Projektmanagement, Termin- und Kapazitätsplanung [Ehr95, S. 162 ff.]. An dieser Stelle soll die Teamarbeit herausgegriffen werden, da sie für diese Arbeit eine besondere Relevanz hat.

Die Bedeutung der Teamarbeit für die Produktentwicklung wurde in zahlreichen Beiträgen gewürdigt [BKB99; MCS+01; ZT03]. Sie ist als Organisationsform der Integrierten Produktentwicklung anerkannt [AH87; Ehr95; Bur01]. Nach SIMON handelt es sich bei der Teamarbeit um eine besondere Form der Zusammenarbeit in der Gruppe. Er stellt heraus, dass *„alle Mitglieder gleiche Rechte und Pflichten haben und die Führung untereinander regeln“* [Sim99, S. 209]. Für das Team ist weiterhin kennzeichnend, dass es nur für einen bestimmten Zeitraum (z. B. für die Dauer eines Projektes) existiert und dass sich die Teammitglieder kooperativ verhalten, um die gestellte Aufgabe zu lösen.

EHRENSPIEL [Ehr95, S. 170] schlägt eine Untergliederung des Teams in „Kernteam“ und „erweitertes Team“ vor (Bild 3.3). Das erweiterte Team schließt diejenigen Teammitglieder ein, die nicht ständig am Projekt mitarbeiten, sondern nur von Fall zu Fall dazu geholt werden. Die Zusammensetzung des Team fluktuiert dabei in Abhängigkeit vom Arbeitsfortschritt und von den anstehenden Aufgaben.

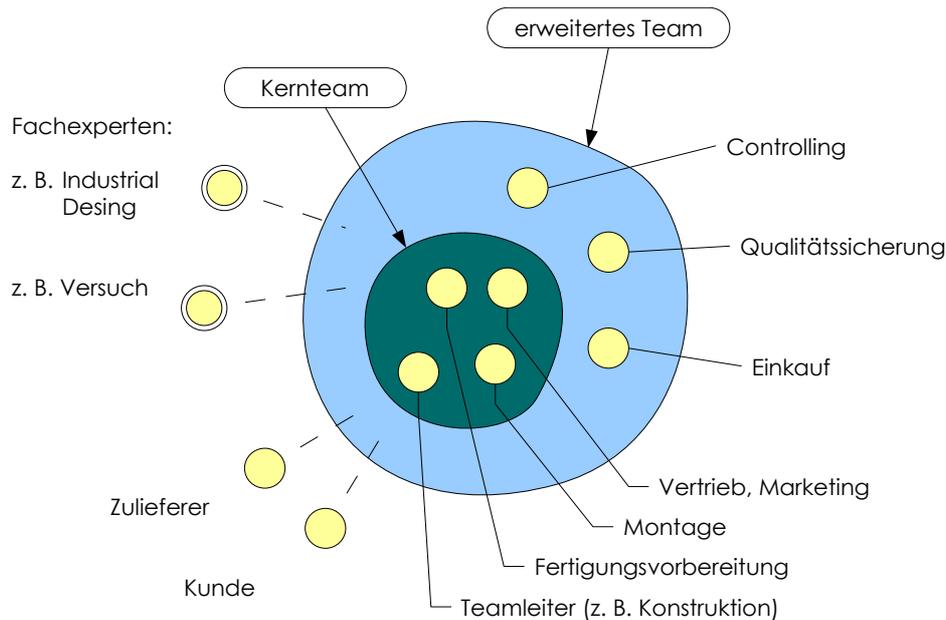


Bild 3.3: Beispiel für die Zusammensetzung von Teams nach EHRENSPIEL [Ehr95, S. 170]

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit setzt Netzwerkstrukturen voraus [Bur01]. Netzwerkartige Beziehungen sind nicht nur für die Arbeit innerhalb des Teams charakteristisch, sondern können darüber hinaus auch in den übergeordneten Ebenen gefunden werden. In einem Unternehmen wird zwischen Beziehungen interner Art (zu anderen Abteilungen) und Beziehungen externer Art (zu Kunden, Kooperationspartnern, Zulieferern) unterschieden. Nach BURCHARDT können Beziehungen die Sachebene umfassen oder personell-organisatorischer, informatorisch-kommunikativer sowie finanzieller Natur sein [Bur01, S. 163].

Bionik findet heute, wie oben dargestellt wurde, vor allem im Rahmen von längerfristig angelegten Forschungsprojekten statt, bei denen Fachleuten verschiedener Gebiete zusammenarbeiten. Vor diesem Hintergrund haben Kooperationen zwischen verschiedenen Organisationen bei Entwicklungsprojekten dieser Art einen besonderen Stellenwert. Die Ermittlung der richtigen Partner ist ein wichtiger Erfolgsfaktor einer Kooperation [Sch02]. Für die Bionik entscheidend ist aber auch, dass die Kommunikation und der Wissenstransfer zwischen den Kooperationspartnern gelingt. Letzteres soll im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden.

### 3.2.4 Werkzeuge und Hilfsmittel

Eine Produktentwicklung ohne den Einsatz von Werkzeugen und Hilfsmitteln ist nicht denkbar. Die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Hilfsmittel lässt sich heute kaum noch überschauen. In allen Phasen des Entwicklungsprozesses und für alle erdenklichen Aufgaben stehen dem Produktentwickler entsprechende Werkzeuge und Hilfsmittel bereit. Aus diesem Grunde kann an dieser Stelle nur eine kleine Auswahl durch ein kurzes Schlaglicht beleuchtet werden.

Wie oben erwähnt, versteht man in der Produktentwicklung nach EHRENSPIEL unter Werkzeugen konkrete Teilmethoden wie z. B. Softwareprogramme. Hilfsmittel hingegen sind stets physische Objekte [Ehr03, S. 134]. Werkzeuge und Hilfsmittel sind direkt oder indirekt an Methoden gekoppelt. In Abhängigkeit von den Zielen, die erreicht werden sollen, richten sie sich an unterschiedliche Anwendergruppen. So werden in der strategischen Produktplanung z. B. Szenario-Analysen durchgeführt, um Marktentwicklungen vorherzusehen und geeignete Produkte als Antwort auf diese Entwicklungen zu definieren. Werkzeuge dieser Methode sind u. a. der Szenario-Trichter, die Chancen-Gefahren-Matrix und die Einflussmatrix [GEK01, S. 105 ff.]. Als Hilfsmittel lassen sich hier bspw. Flipcharts, vorbereitete Formulare oder PCs nutzen. Da die strategische Produktplanung in den meisten arbeitsteilig organisierten Unternehmen der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung vorgelegt ist, sind Produktentwickler in der Regel nicht in die Produktplanung involviert [GEK01, S. 50]. Ungeachtet dessen hat die Produktplanung eine hohe Relevanz für die Bionik und die Entwicklung bionischer Produkte. Durch sie wird nicht nur das Produkt in seinen wesentlichen Zügen definiert, sie legt auch weitestgehend – basierend auf den prognostizierten Umfeldentwicklungen – die Geschäftsstrategie des Unternehmens fest. Hiermit verbunden sind unter anderem auch strategische Entscheidungen z. B. über die Höhe der Mittel für Forschung und Entwicklung oder über mögliche Kooperationspartner.

Für die Lösungsfindung selbst stehen ebenfalls eine Reihe von Werkzeugen und Hilfsmitteln zur Verfügung. Bekannt ist hier z. B. der Morphologische Kasten [Zwi66], ein Ordnungsschema, bei dem die Teilfunktionen einer Lösung und die dazu gehörigen möglichen Teillösungen aufgelistet werden. Durch die systematische Kombination der Teillösungen lassen sich alle theoretisch möglichen Varianten der Gesamtlösung erarbeiten und „weiße Felder“ im Lösungsfeld vermeiden. Das entstehende Lösungsfeld enthält meist auch Lösungsvarianten mit Teillösungen, die nicht miteinander verträglich sind. Die Entscheidung, welche Teillösungen wirklich miteinander kombinierbar sind, ist nicht unproblematisch. Zur Beurteilung von Verträglichkeiten lassen sich gleichfalls Ordnungsschemata wie die Verträglichkeitsmatrix nutzen [PB93, S. 115 f.].

Eine herausragende Stellung haben in der Produktentwicklung ebenfalls Softwarewerkzeuge, die die Konstruktionstätigkeiten in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase unterstützen (z. B. CAD- oder FEM-Programme). Durch sie werden Gestaltung, Berechnung und Simulation des Produktes erleichtert oder überhaupt erst ermöglicht.

Produktentwicklung ist immer auch mit der Suche und Bereitstellung von relevanten Informationen verbunden. Dies gilt in besonderem Maße für Entwicklungsprojekte, die interdisziplinär angelegt sind. Neben Literaturrecherchen und Recherchen im Internet werden im Schrifttum der Bionik häufig Kataloge biologischer Konstruktionen diskutiert, die dem Produktentwickler helfen sollen, Assozia-

tionen zwischen einer technischen Problemstellung und einem möglichen biologischen Lösungsprinzip zu bilden [Hil01]. Diese Katalogsysteme sind einerseits als Papierform andererseits als computerimplementierte Lösung denkbar [NB00, S. 389]. Im Kapitel 6.2 werden für die Bionik zur Verfügung stehende Werkzeuge und Hilfsmittel weiterführend dargestellt und bezüglich ihrer Nutzbarkeit im Produktentwicklungsprozess untersucht.

### 3.3 Konstruktionsarten

Das Schrifttum der Produktentwicklung kennt eine Reihe unterschiedlicher Konstruktionsarten, die sich anhand verschiedener Kriterien einordnen lassen. So lässt sich der Konstruktionsanlass nutzen, um Konstruktionen in *Entwicklungskonstruktion*, *Auftragskonstruktion*, *Angebotskonstruktion* und *Betriebsmittelkonstruktion* zu unterscheiden [VDI2222, S. 8]. In der gleichen Quelle wird der erforderliche Konstruktionsaufwand hinsichtlich der Entwicklung und Änderung von Konstruktionsmerkmalen als ein weiteres wichtiges Unterscheidungskriterium genannt. Hier wird zwischen *Neukonstruktionen*, *Anpassungskonstruktionen* und *Variantenkonstruktionen* unterschieden. Im Folgenden wird dargestellt, welche Beziehung zwischen den Konstruktionsarten und der Entwicklung bionischer Produkte besteht.

#### 3.3.1 Neukonstruktion

Kennzeichen der Neukonstruktion ist, dass das Produkt in wesentlichen Teilen neu erarbeitet wird [VDI2222, S. 9]. Neukonstruktionen treten vor allem dann auf, wenn die Aufgabenstellung neu ist oder wenn zur Lösung eines Problems neue Prinzipien verwendet werden [PB93, S. 4]. Werden für die Problemlösung bekannte Teillösungen ausgewählt oder neu kombiniert, spricht man von Neukonstruktionen 2. Art [VBC+04]. Als Neukonstruktionen 1. Art bezeichnet man Entwicklungen, bei denen technisches Neuland betreten werden muss.

Bei Neukonstruktionen wird in der Regel der gesamte Konstruktionsprozess (Bild 3.1 auf Seite 33) durchschritten. Aufgrund des hohen Neuerungsgrades und den damit verbundenen Unsicherheiten kommt der Zielbestimmung (Ermittlung der Anforderungen) eine besondere Bedeutung zu. Für eine Neukonstruktion ist daher eine umfassende Klärung der Aufgabenstellung und eine Analyse wirtschaftlicher und technischer Randbedingungen zwingend erforderlich. Neukonstruktionen kommen in der Praxis eher selten vor. EHRENSPIEL beziffert ihren Anteil mit höchstens 10 Prozent. Er stellt weiterhin heraus, dass „*wirkliche innovative Neukonstruktionen*“ [Ehr95, S. 216], also Lösungen, für die es auf dem Markt keine ähnlichen Vorläufer gibt, überaus sehr selten sind.

Eine Neukonstruktion bietet bei der Gestaltung von Produkten den größten Spielraum. Für die Entwicklung bionischer Produkte ist dies von Vorteil, denn es bietet sich die Chance, traditionelle Denkweisen zu überwinden und neue Lösungsansätze zu realisieren. Da bei einer Neukonstruktion zu Beginn der Entwicklung weder Funktionen noch Baustrukturen vorgegeben sind, lassen sich die Lösungsprinzipien und Formen, die der Natur abgeschaut wurden, leichter in das zu entwickelnde Produkt einbringen.

Die Bionik kann den Prozess der Neukonstruktion in mehrerlei Hinsicht beeinflussen und unterstützen. Zum einen können die „Grundprinzipien bionischen Designs“ [Nac98b] (Kapitel 6.2.4) genutzt werden, um das Produkt „von Grund auf“ neu zu gestalten. Zum zweiten können mit Hilfe geeigneter Kataloge naturanaloge Funktionsprinzipien gefunden und im Rahmen der Produktentwicklung genutzt werden [Hil01]. Zum dritten kann die Formensprache der Natur relativ leicht in die Gestaltung eines Produktes einfließen. Dieser Prozess lässt sich ebenfalls durch Kataloge unterstützen. Das Studium natürlicher Formen und Strukturen kann den Produktentwickler anregen und zu einer ästhetischen und zweckmäßigen Produktgestaltung beitragen [Woh05].

Darüber hinaus lassen sich die Prinzipien der Evolution selbst zur Gestaltung und Optimierung des Produktes zu nutzen [Gol89; Rec94]. So können verschiedene Lösungsvarianten nach den Gesetzen der Evolution miteinander kombiniert werden und so zu neuen (und oft besseren) Lösungen führen. Bislang fand dieses Entwicklungsprinzip vor allem in den Phasen statt, in denen das Lösungskonzept bereits recht detailliert ausgearbeitet war. Bekannt sind z. B. Ansätze, bei denen ein evolutionärer Algorithmus in einem Produktmodell Geometrieparameter, Bauteilanordnungen, Materialien u. ä. veränderte und so die Produkteigenschaften optimierte [VBC+04]. Es ist jedoch auch denkbar, das Prinzip auf die sehr frühen Phasen der Produktentstehung auszudehnen und z. B. die optimale Funktionsstruktur eines Produktes zu ermitteln. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass Funktionsstrukturen modelliert und rechnerunterstützt bewertet werden können.

### **3.3.2 Anpassungskonstruktion**

Anpassungskonstruktionen basieren auf einem existierenden Produkt [VDI2222, S. 8]. Die Modifikationen erfolgen z. B. aufgrund veränderter Kundenwünsche oder einer geänderten Marktsituation. Neue Möglichkeiten der Fertigung oder der Einsatz neuer Materialien können ebenfalls Anlass für eine Anpassungskonstruktion sein. Das Lösungsprinzip wird bei dieser Konstruktionsart im Wesentlichen beibehalten. Variiert werden in der Regel die Gestalt, der Werkstoff oder die Abmessungen des Produktes. Dabei kann es durchaus vorkommen, dass einzelne Funktionsträger neu konstruiert werden müssen [Vaj82].

Da bei einer Anpassungskonstruktion der Freiraum für die Produktgestaltung geringer ist als bei einer Neukonstruktion, sind auch die Einflussmöglichkeiten der Bionik beschränkt. Zwar ist es denkbar, dass bei der Gestaltung neu zu konstruierender Teillösungen naturanaloge Formen und Funktionsprinzipien genutzt werden, jedoch müssen diese zu den anderen Teillösungen kompatibel sein und sich in das Konzept des Gesamtprodukt integrieren lassen.

Wie bei der Neukonstruktion können auch bei einer Anpassungskonstruktion die Prinzipien der Evolution genutzt werden, um ein Produkt zu gestalten. Die Voraussetzungen für eine solche Vorgehensweise sind bei einer Anpassungskonstruktion jedoch ungleich besser, denn Anpassungskonstruktion basieren, wie oben erwähnt, auf einem vorhandenen Produkt. Da hier der Konstruktionsprozess für weite Teile des Produktes bereits vollständig durchlaufen wurde, existiert in der Regel auch eine Reihe von Modellen, die die Eigenschaften und das Verhalten des Produktes beschreiben. CAD-Modelle oder Berechnungsmodelle sind Beispiele hierfür. Sie stehen während einer Anpassungskonstruktion zur Verfügung und können (ggf. mit Änderungen) genutzt werden, um neue Lösungsvarianten zu generieren und zu bewerten. VAJNA ET AL. [VBC+04] zeigten, wie die Kopplung von CAD- und Berechnungsmodellen und die Anbindung an einen Evolutionäre Algorithmus in der Praxis realisiert werden kann.

### 3.3.3 Variantenkonstruktion

Als Variantenkonstruktion werden solche Konstruktionen bezeichnet, die ein Produkt „*innerhalb von Grenzen vorausgedachter Systeme*“ [PB93, S. 5] verändern. Nach EHRENSPIEL liegen bei Variantenkonstruktionen Gestalt und Werkstoff der Lösung fest, so dass nur noch die Maße, die Anzahl oder Anordnung einzelner Bauteilen oder Baugruppen variable Größen sind [Ehr95, S. 217]. Einige Autoren führen weiterhin an, dass bei einer Variantenkonstruktion geometrische Änderungen nur innerhalb fest vorgegebener Grenzen und Schrittweiten zulässig sind [VS90, S. 474 f.]. Dieses zusätzliche Kriterium erleichtert die Abgrenzung zur Anpassungskonstruktion.

Durch die Vorgabe definierter Parameterwerte entstehen Baureihen und Baukästen, die sich gut mit einer Konstruktionslogik (Parametrik) hinterlegen lassen [Ehr95, S. 217]. Auf diese Weise kann ein Produkt in Abhängigkeit von bestimmten Kundenwünschen automatisch konfiguriert werden. Die Erstellung der Logik erfordert zwar im Vorfeld einen erhöhten Aufwand, dafür kann die Auftragsbearbeitung zügig durchlaufen werden, denn Probleme bei der Konstruktion werden weitestgehend ausgeschlossen [PB93, S. 5]. Aus diesem Grund ist die Verwendung von standardisierten Bauteilen und die automatische Konfiguration des Produktes für Unternehmen besonders reizvoll. EHRENSPIEL weist jedoch darauf hin, dass das Potential der Variantenkonstruktion noch nicht ausgeschöpft ist. Durch

eine konsequente Nutzung von Baureihen, Baukästen und Parametrik hält er eine Steigerung ihres Anteils von derzeit 30 Prozent auf etwa 70 Prozent für möglich [Ehr95, S. 217].

Die Variantenkonstruktion bietet der Bionik kaum Einflussmöglichkeiten. Da die Lösung hinsichtlich ihres Funktionsprinzips, der Gestalt und der Materialien feststeht, können in diesen Punkten keine Anregungen aus der Natur übernommen werden. Darüber hinaus sind auch naturanaloge Optimierungsverfahren in der Variantenkonstruktion nicht einsetzbar, denn die möglichen Lösungen sind durch ein Regelwerk festgeschrieben. Neue Lösungen, wie sie bei der Neu- und Anpassungskonstruktion entstehen, werden durch eine Variantenkonstruktion nicht hervorgebracht.

Obwohl sich die Bionik vordergründig nicht in die Variantenkonstruktion einbringen kann, so ist es dennoch denkbar, dass sie mit ihren Lösungen „im Hintergrund arbeitet“. Baureihen- und Baukastensysteme von komplexen Produkten haben in der Regel einen Umfang, der eine computerunterstützte Verwaltung erfordert. Wenn die Konfiguration eines Produktes sich nicht mehr durch die Verkettung trivialer *wenn-dann*-Beziehungen beschreiben lässt, stehen mit *Neuronalen Netzen* und *fuzzy logic* wirkungsvolle Werkzeuge zur Verfügung [BKK+03], die wie auch die Evolutionären Algorithmen von der Natur und ihren Lösungen inspiriert wurden.

### 3.3.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle genannten Konstruktionsarten direkt oder indirekt von den Lösungen der Natur profitieren können. Die Bionik kann einerseits das Produkt selbst, andererseits auch seinen Entstehungsprozess positiv beeinflussen. Im Vergleich zeigen sich jedoch auch deutliche Unterschiede. So beschränkt sich der Beitrag der Bionik in der Variantenkonstruktion auf ein „hintergründiges Wirken“. Im Gegensatz dazu können bei Neukonstruktionen (und in eingeschränkter Weise auch bei Anpassungskonstruktionen) Formen, Strukturen und Funktionsprinzipien der Natur direkt in die Gestaltung des Produktes einfließen. Die Tatsache, dass Neukonstruktionen im Alltag der Produktentwicklung eher eine Ausnahme darstellen, macht deutlich, dass der Bedarf nach „Inspirationen aus der Natur“ vergleichsweise beschränkt ist. Vor diesem Hintergrund ist es auch verständlich, dass trotz der Erfolgsgeschichten und einer Vielzahl von erkannten Anregungsmöglichkeiten der von vielen erwartete „endgültige Durchbruch“ der Bionik bislang ausbleibt.

## 3.4 Entwicklung technischer Systeme

Technische Produkte sind keine autarken Systeme. Sie haben Wechselwirkungen mit dem Menschen, mit der Umwelt und mit anderen technischen Systemen. Die gegenseitige Beeinflussung führt dazu,

dass sich die Systeme verändern. In den folgenden Abschnitten werden die Gesetzmäßigkeiten ihrer Evolution beschrieben und aktuelle Entwicklungstrends dargestellt.

### 3.4.1 Evolution technischer Systeme

Technische Produkte sind, wie andere Systeme auch, durch eine S-förmige Lebenslinie gekennzeichnet [Alt84, S. 115]. Das Bild 3.4 stellt die Entwicklung der Hauptkenngrößen (Leistung, Geschwindigkeit, Kapazität, etc.) über die Zeit idealtypisch dar. Die Entwicklung in der „Kindheit“ verläuft relativ langsam. Das System ist hier noch relativ unausgereift und bedarf eines hohen Entwicklungsaufwandes. In der Reifephase nimmt die Leistungsfähigkeit sprunghaft zu. Das technische Produkt hat sich auf dem Markt etabliert. Die in der Anfangsphase geleisteten Aufwendungen fließen nach und nach zurück und können in die Weiterentwicklung des Systems investiert werden. Die Phase des „Alterns“ ist durch den Rückgang des Entwicklungstempos gekennzeichnet. Die Möglichkeiten des dem System zugrunde liegenden Prinzips sind weitestgehend erschöpft und eine Weiterentwicklung ist nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Ein technisches System kann in dieser Phase sehr lange Zeit verharren. Oft ist es jedoch so, dass ein technisches System in seiner Alterungsphase durch ein neues System, das auf einem anderen Prinzip basiert, abgelöst wird.

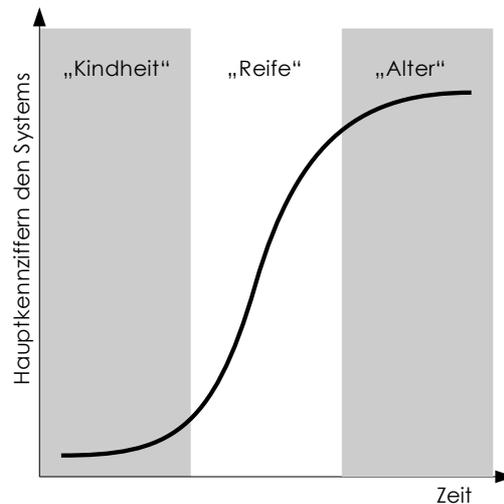


Bild 3.4: "Lebenslinie" von Systemen [ALT84, S. 115]

Ein neues System entsteht nicht aus dem Nichts heraus, sondern stets auf der Grundlage von bereits vorhandenen Elementen. Hinsichtlich der Entwicklung technischer Produkte können diese Elemente z. B. bestehende Technologien, Materialien oder Wissen im Allgemeinen sein. Der Übergang von einem technischen System zum anderen kann als evolutionärer Prozess aufgefasst werden [VB94; Weg99; Cle05]. In der biologischen Evolution erfolgt die Weiterentwicklung der Systeme im Wesentlichen durch den vertikalen Gentransfer, bei dem das Erbgut, das durch Mutation und Rekombination verändert wurde, von Generation zu Generation weitergegeben wird. Die Evolution

technischer Systeme kann in analoger Weise betrachtet werden (Bild 3.5). Das „Erbgut“ technischer Systeme ist das Wissen um diese Systeme. Dieses Wissen verändert sich im Laufe der Zeit. Neue Erkenntnisse kommen hinzu, andere werden obsolet. Wissen ist der Grundbaustein für die Entwicklung neuer Produkte.

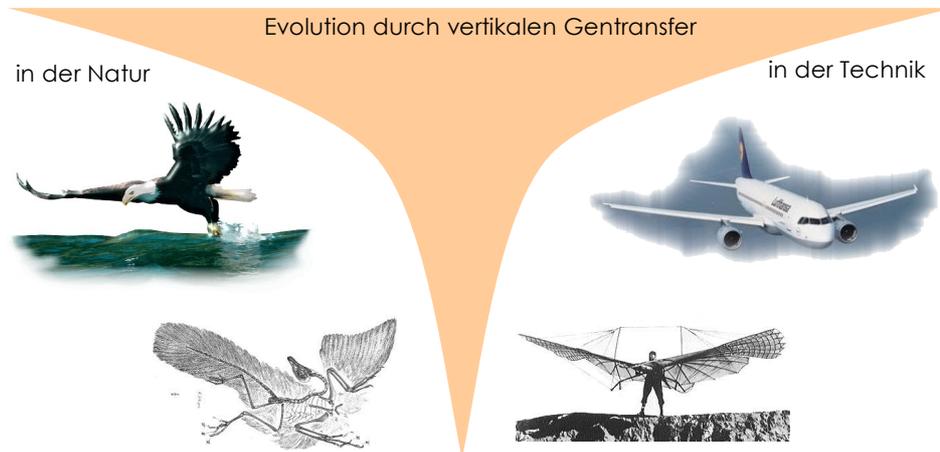


Bild 3.5: Evolution durch vertikalen Gentransfer

Die vertikale Weitergabe von Wissen von einer Produktgeneration zur nächsten ist nur ein Grundpfeiler für die Evolution technischer Systeme. Neben der Weitergabe von genetischen Informationen innerhalb einer Art ist auch der Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Arten möglich [Har04]. Dieser horizontale Gentransfer führt zu Sprüngen in der Evolution. In der Natur kommt er nur sehr selten vor<sup>8</sup>. Für die Evolution technischer System hingegen hat er eine große Bedeutung, denn das Wissen eines Fachgebietes kann durch Kommunikation einem anderen zur Verfügung gestellt werden (Bild 3.6). Auch wenn die Kommunikation zwischen Experten verschiedener Fachgebiete nicht immer problemlos ist (vgl. Kapitel 5.3), kann der fachübergreifende Austausch von Ideen und Wissen den Anstoß für die Entwicklung innovativer Produkte bilden.

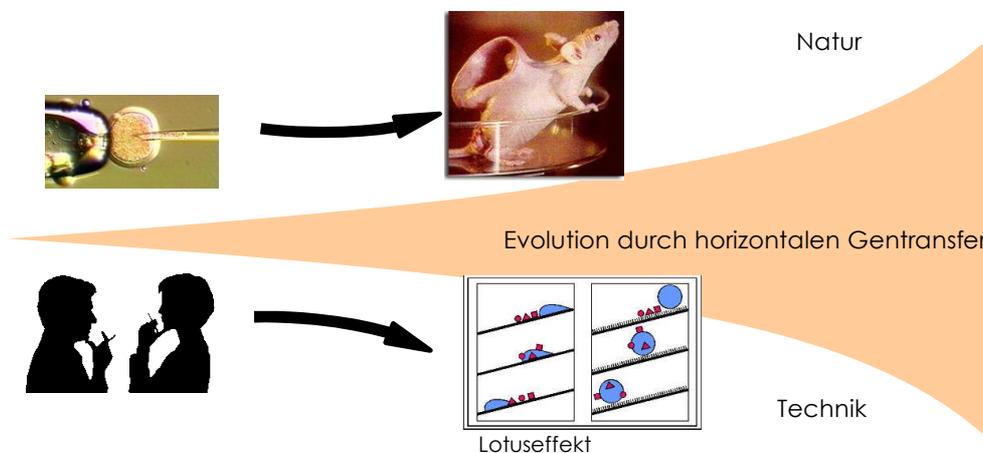


Bild 3.6: Evolution durch horizontalen Gentransfer

<sup>8</sup> Der Austausch genetischer Informationen über Artengrenzen hinweg ist in der Natur nur bei Einzellern zu finden. Durch die Gentechnik wird es jedoch möglich, artfremde Gene auch in einen höher entwickelten Organismus einzuschleusen.

Die Entwicklung eines Systems wird maßgeblich durch seine Wechselwirkungen mit anderen Systemen bestimmt. Dieser Prozess hat eine hohe Dynamik und lässt sich daher nur schlecht vorherbestimmen. Dennoch unterliegt die Entwicklung von Systemen gewissen Gesetzmäßigkeiten, die im Folgenden dargestellt werden sollen.

### 3.4.2 Entwicklungstrends technischer Systeme

Systeme streben bei ihrer Entwicklung einen idealen Zustand an. Ein ideales System besteht dann, wenn es kein System mehr gibt, seine Funktion oder sein Zweck aber dennoch erfüllt wird [Alt84, S. 126]. Die Zunahme der Idealität eines Systems wird z. B. dadurch deutlich, dass im Laufe der Entwicklung der Material- und Energieeinsatz im System reduziert werden, dass die Nutzung von Umwelt- und Fremdenergie steigt und dass sich geschlossene Stoffkreisläufe ausbilden.

Die Entwicklung eines Systems ist in der Regel mit der Ausbildung von Teilsystemen verbunden. Dabei können einerseits Systeme entstehen, die darauf spezialisiert sind, bestimmte Teilfunktionen zu erfüllen. Andererseits kann durch die Bildung von unabhängigen Teilsystemen, die jedoch im System die gleiche Aufgabe haben, die Ausfallsicherheit des Systems verbessert werden. Dieser Prozess der Erhöhung der Granularität und der Dispersität der Systemelemente ist charakteristisch für die Systementwicklung.

Die Spezialisierung und Optimierung der Teilsysteme eines technischen Produktes vollzieht sich zunächst auf der Makroebene. Ist hier eine weitere Verbesserung nicht mehr möglich, wird die Anpassung auf der Mikroebene fortgesetzt. Dabei kann es vorkommen, dass sich die Elemente eines technischen Systems ungleichmäßig entwickeln. Sind seine Elemente nicht mehr aufeinander abgestimmt, entstehen Widersprüche, aus denen sich nach Ansicht von ALTSCHULLER Erfindungsaufgaben ableiten [Alt84, S. 127].

Die Veränderung eines technischen Systems umfasst nicht nur die Optimierung der Systemelemente selbst. Sie ist auch mit einer zunehmenden Vernetzung der einzelnen Systemelemente und mit einer verstärkten Einbeziehung der Nachbarsysteme verbunden. Durch diesen Prozess entsteht letztlich ein übergeordnetes System, dessen Entwicklung in analoger Weise erfolgt.

ALTSCHULLER formulierte die Entwicklungstrends technischer Systeme in Form von Gesetzmäßigkeiten [Alt84, S. 124 ff.]. Ähnliche Darstellungen sind auch bei REICHEL [Rei84] und LINDE & HILL [LH93] zu finden. Nach LINDE & HILL [LH93, S. 77] kann die Entwicklung eines jeden Systems durch folgende Evolutionsetappen beschrieben werden:

- *Entstehungsetappe*: Es entstehen explosionsartig neuartige Systemstrukturen. Für eine Funktion werden eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturen hervorgebracht.

- *Optimierungsetappe*: Die Systeme vervollkommen sich. Es kommt zur Spezialisierung und Nischenbildung.
- *Dynamisierungsetappe*: Durch Regelbarkeit wird eine optimale Anpassung des Systems an verschiedenen Umgebungsbedingungen erreicht.
- *Obersystembildung*: Das System hat seine Entwicklungsmöglichkeiten ausgeschöpft und wird als Untereinheit in ein sich neu bildendes System aufgenommen.

Die Gesetze der Systemevolution sind nicht nur theoretischer Natur. Sie können genutzt werden, um die Entwicklungspotentiale technischer Produkte zu ermitteln und die Entwicklungsziele festzulegen [Hil01, S. 99]. Ihre Relevanz für die Produktentwicklung spiegelt sich auch in aktuellen Beiträgen des Schrifttums wider [LJP+03; MAW03; BW03]. Hier werden zur Beschreibung technischer Entwicklungen häufig Schlagworte wie *Modularisierung*, *Funktionsintegration*, *Leichtbau*, *Erhöhung der Flexibilität* und *Miniaturisierung* genutzt, die letztlich den Übergang von einer Evolutionsetappe zur nächsten zum Ausdruck bringen.

### 3.5 Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels war es, die Vorgehensweise des Produktentwicklers zu skizzieren und die Bionik in den Entwicklungsprozess einzuordnen. Dabei wurden die Potentiale und Grenzen des bionischen Arbeitens offensichtlich. Bislang existiert im Schrifttum kein einheitliches Verständnis davon, wo Bionik „anfängt“ und wo sie „aufhört“. In der Produktentwicklung wird die Bionik häufig als Methode zur Lösungsfindung gesehen. Jedoch unterscheidet sie sich deutlich von vielen anderen Methoden, die in den Methodenkatalogen aufgeführt sind. Das Vorgehen beim bionischen Arbeiten ist nur wage beschrieben. Häufig werden Recherchetätigkeiten und die fachübergreifende Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren im Zusammenhang mit dem bionischen Arbeiten genannt. Vorschriften oder gar „Arbeitsanweisungen“ für das bionische Arbeiten existieren jedoch nicht. Vor diesem Hintergrund erscheint es nicht sinnvoll, von der Bionik als *Methode* zu sprechen (vgl. Kapitel 3.2). Vielmehr ist sie, wie auch im Schrifttum der Bionik von einigen Autoren betont wird, als eine *Denk- und Arbeitsweise* zu verstehen.

Bionisches Arbeiten erfolgt in der Regel in einem interdisziplinären Team. Zwar gehört die fachübergreifende Zusammenarbeit von Experten heute zum Alltag einer jeden Produktentwicklung, doch die Einbindung von Biologen in den Entwicklungsprozess ist bei Weitem nichts Selbstverständliches. Tatsächlich scheint die Notwendigkeit, für die Lösungsfindung auf Anregungen aus der Natur zurückzugreifen, nur selten gegeben. Zum einen ist der Anteil der Neukonstruktionen verglichen mit

der Gesamtheit der Entwicklungsaufgaben relativ gering, zum anderen stehen dem Produktentwickler genügend andere Möglichkeiten zur Verfügung, eine technische Problemstellung zu lösen.

Ungeachtet dessen findet „bionisches Gedankengut“ nach und nach Einzug in die Produktentwicklung und die angrenzenden Bereiche. Bionik beinhaltet inzwischen mehr als Lotus-Effekt und Hai-fischhaut. Durch die zunehmende Vernetzung der Fachbereiche und die allmähliche Verbreitung der Erkenntnisse über biologische Strukturen und Prinzipien dringt sie schleichend in viele Lebensbereiche ein. Bionik hat zahlreiche Facetten. Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigten, dass sie in der ein oder anderen Form längst zum Alltag der Produktentwicklung gehört. Die Darstellungen in den nachfolgenden Kapiteln stellen speziell auf die Lösungsfindung ab. Es wird gezeigt, wie der Prozess der Lösungsfindung abläuft und wie die Bionik diesen Prozess unterstützen kann.

*Je weniger Biologie involviert ist, desto einfacher ist es.*

*JÜRGEN BERTLING*

## 4 Lösungsfindung

Die Kapitel 2 und 3 charakterisierten die Bionik und die Produktentwicklung in ihren wesentlichen Zügen. Sie schufen die Grundlagen für das Verständnis des Umfeldes und skizzierten den Problembereich. Dabei wurde deutlich, dass eine systematische Untersuchung der Lösungen der Natur und eine Analyse im Hinblick auf ihre technische Anwendungsmöglichkeiten der Produktentwicklung vielfältige Impulse liefern kann. Die Bionik zeigt dem Produktentwickler alternative Lösungsmöglichkeiten auf und trägt so zur Erweiterung des Lösungsfeldes bei. Dies ist vor allem für die Phase des Konzipierens relevant, wo es darauf ankommt, eine große Vielzahl an Alternativen zu generieren. Aus Sicht der Produktentwicklung ist die Bionik ein Werkzeug. Sie steht in Konkurrenz zu anderen Werkzeugen und Methoden, wie z. B. Kreativitätstechniken.

Zur weiteren Einkreisung und Abgrenzung des Problemfeldes soll im Folgenden anhand einiger Beispiele gezeigt werden, wie sich die Lösungsfindung im Produktentwicklungsprozess gestaltet. Sie wird dabei nicht allein unter dem Gesichtspunkt der Bionik betrachtet; vielmehr soll dargestellt werden, wie der Produktentwickler im „Konstruktionsalltag“ zu Lösungsansätzen kommt und welche Rolle Analogien dabei spielen. Darauf aufbauend werden die aus Sicht der Produktentwicklung wesentlichen Fragestellungen eines fachübergreifenden Wissenstransfers herausgearbeitet und thesenförmig zusammengefasst. Die Thesen stellen somit den Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit dar.

### 4.1 Lösungsfindung in der Praxis

Um den Prozess der Lösungsfindung besser verstehen zu können, sollen zunächst einige Beispiele von Entwicklungsprojekten dargestellt und diskutiert werden. Die Beispiele spiegeln zu einem großen Teil die Ergebnisse von Projekten wider, die im Rahmen der Studienrichtung Integrierte Produkt-

entwicklung (IPE) am Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg durchgeführt wurden. Eine Besonderheit dieser Studienrichtung stellt die interdisziplinäre Projektarbeit dar. Dabei arbeiten Studenten der Fachbereiche Integrierte Produktentwicklung, Allgemeiner Maschinenbau, Industriedesign<sup>1</sup>, Computervisualistik<sup>2</sup>, Sport- und Technik, Entrepreneurship und Marketing gemeinsam an der Lösung von Produktentwicklungsaufgaben. Die Projekte zeichnen sich durch eine hohe Praxisrelevanz aus, d. h. die Aufgabenstellungen werden meist von Unternehmen formuliert und die Projekte finden in enger Kooperation mit den Industriepartnern statt [VN01; NVG04]. Als weitere Quellen dienen eine Diplomarbeit [Lei05] sowie ein Beispiel aus der Industrie, das einer Dissertation [Gra04] entnommen wurde.

### 4.1.1 IPE-Projekt: Schleifgerät

Die Gleiteigenschaften eines Skis und seine Fähigkeit, „sich in den Berg zu kanten“, nehmen mit der Zeit ab. Verursacht wird dies durch die Reibung an der Kontaktfläche zwischen Schnee und Ski, die zu einer Deformation der Skikanten führt. Zusätzlich zerstören Gestein oder Eis auf weniger gut gepflegten Pisten die Lauffläche. Der Skifahrer ist daher gezwungen, seine Ski nachzuschleifen. Dies kann er entweder durch geschultes Fachpersonal an entsprechenden Schleifmaschinen, wie sie in Sportfachgeschäften oder im Ski-Verleih verfügbar sind, erledigen lassen, oder er schleift seinen Ski mit diversen Schleifutensilien selbst. Letzteres hat jedoch nur selten den gleichen qualitativen Effekt wie ein professioneller Schliff. Vor diesem Hintergrund entstand die Aufgabe für die Studenten: Es ist ein Skikantenschleifgerät für Hobby-Skifahrer zu entwickeln.

Im Rahmen der Lösungsfindung entstand eine Vielzahl von Skizzen. Die Mehrzahl der Entwürfe orientierte sich an den Formen bekannter Heimwerkergeräte. Besonders das „Look and Feel“ der Produktlinie des auftraggebenden Unternehmens flossen in die Gestaltung ein. Daneben wurde jedoch auch eine Reihe von Vorschlägen diskutiert, bei denen sich die Studenten durch Formen anderer Bereiche inspirieren ließen. So gab es Entwürfe, bei denen Assoziation zu technischen Geräten wie Bügeleisen und Computermäusen unverkennbar waren, oder bei denen sich die Gestaltung, wie im Bild 4.1 dargestellt, an Formen aus dem Tierreich orientierte.

---

1 Studenten des Fachbereiches „Ingenieurwesen und Industriedesign“ der Fachhochschule Magdeburg-Stendal

2 Schwerpunkt Konstruktion und Fertigung

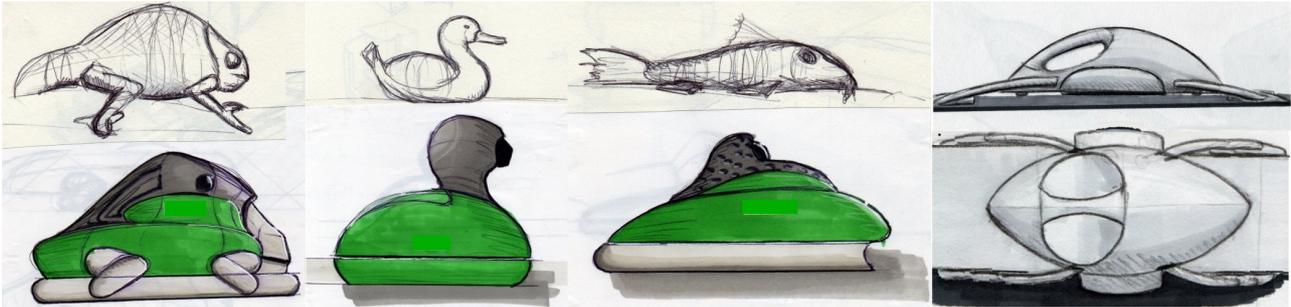


Bild 4.1: Gestaltungsentwürfe für ein Schleifgerät (Chamäleon, Ente, Wels und Käfer)

Die biologisch inspirierten Lösungen wurden vor allem von den Studenten des Fachbereichs „Ingenieurwesen und Industriedesign“ der Hochschule Magdeburg-Stendal vorgestellt. Dies ist wenig verwunderlich, ist doch der Bionik-Gedanke hier in besonderer Weise verwurzelt [Woh05]. Die Studenten gaben an, dass die Inspiration zu den Formen der Natur nicht zufällig erfolgte. Vielmehr nutzten sie, ohne dass von Seiten der Betreuung dazu aufgefordert wurde, während des Gestaltungsprozesses Zeitschriften und Magazine, in denen Tierfotos zu finden waren, und ließen sich von den Formen inspirieren.

#### 4.1.2 IPE-Projekt: Carving-Hilfe

Das *Carven*<sup>3</sup> ist eine Skifahrttechnik. Im Unterschied zu den klassischen Brems- oder Driftschwüngen handelt es sich bei den Carvingschwüngen um Beschleunigungs- oder Taillierungschwüngen. Der Ski wird dabei durch seitliches Kippen der Unterschenkel aufgekantet. Hierzu werden die Knie mit Hilfe der Oberschenkel in das Kurveninnere gedrückt. Der Ski wird durchgebogen und gleitet aufgrund seiner mehr oder weniger starken Taillierung in einem skispezifischen Radius durch die Kurve.

Da die Skistöcke beim Carven weitestgehend ungenutzt sind, entstand die Idee, die Stöcke in die Bewegung einzubinden und das Aufkanten der Ski zu unterstützen. Das Ziel des Projektes war es daher, für die Stöcke eine Halterung auf dem Ski zu entwickeln. Eine solche Carvinghilfe sollte Skineulingen ein schnelleres Erlernen des Carvens ermöglichen und versierten Skifahrern ein vollkommen neues Fahrgefühl vermitteln.

Im Rahmen des Projektes wurden eine Vielzahl von Möglichkeiten diskutiert, um den Skistock auf dem Ski zu befestigen. Die Carvinghilfe sollte ein einfaches Aufnehmen und Auslösen der Stöcke gewährleisten, gleichzeitig sollte sie eine Rotation in Fahrtrichtung ermöglichen. Die Studenten entwickelten eine Reihe von Klick- und Klemmmechanismen. Diskutiert wurde ebenfalls eine magnetische Befestigung. Für das finale Konzept wurde eine Variante favorisiert, für die im Team die Bezeich-

<sup>3</sup> Der Begriff „Carven“ hat seinen Ursprung im Englischen („to carve“) und bedeutet dort *einschneiden* oder *ritzen*.

nung *Fixierung durch das Kugelschreiberprinzip* geprägt wurde. Bei dieser Variante wurden die Skistockspitzen in einen Adapter geschoben. Der Adapter sollte innen mit Querlamellen beschichtet werden, die aus einem Elastomer-Werkstoff bestehen. Die Geometrie der Querlamellen wurden dabei so gewählt, dass die auftretende Reibung eine hinreichende Fixierung der Stöcke ermöglicht und der Adapter gleichzeitig unterschiedliche Stockspitzen aufnehmen kann.



Bild 4.2: Finales Konzept der Carvinghilfe

Das geschilderte Projekt „Carvinghilfe“ ist ein Beispiel dafür, wie eine recht vage Analogie in der Produktentwicklung genutzt werden kann. Die Analogie war in diesem Fall nicht viel mehr als ein Kommunikationsmittel, das die Verständigung bei Diskussionen im Team erleichterte. Dies kommt auch darin zum Ausdruck, dass das finale Lösungskonzept mit dem Original „Kugelschreiberhalter“ nur relativ wenig gemein hat.

### 4.1.3 IPE-Projekt: Ampel-Informations-System

An Straßenkreuzungen wird der Verkehr oft durch Ampeln geregelt. Handelt es sich um eine Kreuzung mit mehreren Fahrspuren (z. B. für Linksabbieger), werden die Ampeln in der Regel über der Fahrbahn angeordnet. Für Kraftfahrzeuge, die unmittelbar vor der Ampelanlage halten, ist die Ampel dann oft nur schwer einsehbar. Der Fahrer muss sich nach vorn lehnen, um die Ampel zu erkennen (Bild 4.3). Zudem können Fahrzeuge auf der benachbarten Fahrspur den Blick auf die Ampel verdecken. Das Ziel des Projektes war es daher, für PKWs eine Lösung zu entwickeln, die zur Sichtverbesserung an Ampeln führt.

Wie gewohnt, begannen die Studenten mit einer Recherche. Die gefundenen Lösungen nutzten in der Regel Spiegel oder Kameras, um dem Fahrer Objekte, die außerhalb seines Sichtfeldes liegen, sichtbar zu machen. Durch die Recherche wurden die Studenten jedoch auch auf eine Lösung aufmerksam, die die weitere Entwicklung maßgeblich prägte: Bei Rückwärtsfahrten kann der Fahrer eines PKWs Objekte, die sich hinter dem Fahrzeug und unterhalb der Heckscheibe befinden, nur schlecht einsehen. Zur Sichtverbesserung werden hier Fresnellinsen angeboten. Dabei handelt es sich um

Stufenlinsen. Ihr Konstruktionsprinzip erlaubt die Realisierung kurzer Brennweiten bei gleichzeitig kompaktem Abmaß und geringem Gewicht. In Heckscheiben von PKWs werden Fresnellinsen in Form von Weitwinkellinsen als Folie verwendet.

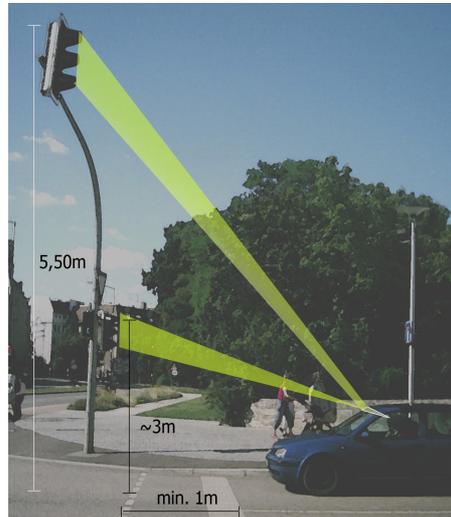


Bild 4.3: Sicht auf eine Ampel

Es lag nahe, das Prinzip der Fresnellinse auch auf die Frontscheibe zu übertragen. Dabei war zu berücksichtigen, dass die Linsen an Front- und Heckscheibe unterschiedlichen Randbedingungen unterliegen. So sollte die Linse an der Frontscheibe Objekte sichtbar machen, die sich *schräg über* dem Fahrzeug befanden. Ihr Brechungswinkel musste daher anders als an der Heckscheibe gestaltet werden, wo es darum geht, Objekte, die sich *schräg unter* dem Fahrzeug befinden, sichtbar zu machen. Als weiterer Punkt ist die Gesamtgestaltung der Linse zu nennen. Die Fresnellinsen, die für Heckscheiben angeboten werden, sind konzentrisch gestaltet. Für die Windschutzscheibe sollte jedoch eine Linse verwendet werden, die als schmalen Streifen über die gesamte Breite der Frontscheibe gelegt wird. Daraus resultiert ein anderer Schliff der Linse.

#### 4.1.4 Ideenfindung durch Wettbewerbsanalyse

Die Analyse von Wettbewerbern und ihrer Produkte stellt für Unternehmen ein wirkungsvolles Werkzeug dar, um zum einen die Stärken und Schwächen potentieller Wettbewerber aufzudecken und zum anderen die eigene Position am Markt festzustellen. Gleichzeitig kann eine solche Wettbewerbsanalyse (im Speziellen eine Bauteilanalyse) den Produktentwicklungsprozess unterstützen, regt sie doch den Ideenfindungs- und Konzeptentwicklungsprozess an und führt so zu einer Verbesserung der Produkteigenschaften und zur Generierung neuer Produktideen.

Zur Speicherung der Ergebnisse solcher Produktanalysen bieten sich Datenbanken an. Die gewonnenen Erkenntnisse werden strukturiert erfasst und gespeichert, und erleichtern so dem Produktentwickler die spätere Suche im Datenbestand. Im Rahmen einer Diplomarbeit [Lei05] wurde ein sol-

ches Datenverwaltungssystem für die Bauteilanalyse von Außenkarosserieteilen von Nutzfahrzeugen konzipiert und prototypisch umgesetzt<sup>4</sup>. In der Arbeit wurde auch gezeigt, wie das System die Entwicklung von Außenkarosserieteilen in der frühen Konzeptphase unterstützen kann. Untersucht wurden hier vor allen die verwirklichten Bauteil-, Fugenkonzepte und Fertigungsstrategien.

Durch die Analyse wurden Unterschiede des Vorderwagens hinsichtlich der Bauteiltrennung und Fugenkonzepte offensichtlich. Sie zeigte darüber hinaus, dass im untersuchten Fahrzeugsegment außer dem auftraggebenden Unternehmen selbst kein anderer Hersteller auf ein aufgelegtes Klappenkonzept zurückgegriffen hat. Ein solches Konzept ermöglicht zwar – im Gegensatz zur eingelegten Klappe – einen einfach zu fertigenden Kotflügel ohne Hinterschnitte (vgl. Bilder 4.4 und 4.5), doch der Fertigungsprozess der Klappe selbst gestaltet sich schwieriger als beim Konzept der eingelegten Klappe. Die Ursache ist der Bördelprozess von Innen- und Außenblech. Beim Konzept der eingelegten Klappe ist dieser einfacher und daher besser beherrschbar.

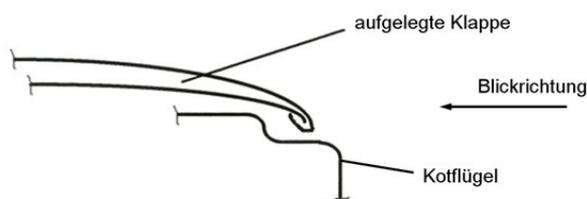


Bild 4.4: Konzept der aufgelegten Klappe [Lei05, S. 89]

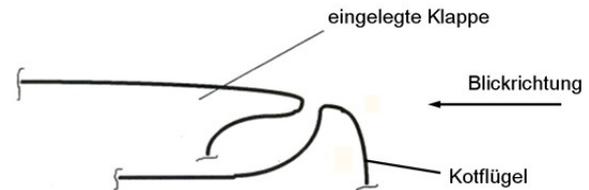


Bild 4.5: Konzept der eingelegten Klappe [Lei05, S. 88]

Die gefundenen Konzepte und Varianten wurden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile diskutiert. Auf der Basis dieser Erkenntnisse konnten in einem nächsten Schritt mögliche Varianten systematisch generiert und bewertet werden. Aus Sicht der Analogiebetrachtungen ist es interessant, dass dabei auch Konzepte, die ursprünglich für den Heckbereich eines Fahrzeugs entwickelt wurden, auf die Vorderfront angewendet wurden. So wurde z. B. bei einem der Konkurrenzfahrzeuge der Bereich der D-Säule durch ein aufgesetztes Kunststoffteil, in dem die Rückleuchte eingelassen war, verkleidet. Durch diese Lösung wurden die Seitenwand und die Heckklappe gleichermaßen vereinfacht. Sie ermöglichte das Konzept einer eingelegten Klappe bei gleichzeitiger Vermeidung einer hinterschnittigen Seitenwand. Das Bild 4.6 zeigt die Übertragung dieses Konzeptes auf den Vorderwagen.

<sup>4</sup> Für die Diplomarbeit wurde eine Geheimhaltung vereinbart. Eine Einsichtnahme in die Arbeit und die Verwendung von Zitaten und Abbildungen ist daher nur mit Zustimmung von Volkswagen möglich.

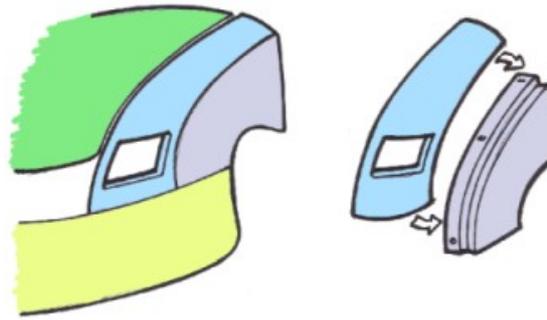


Bild 4.6: Konzept des Vorderwagens [Lei05, S. 95]

Die Gestaltung des Vorderwagens in der dargestellten Form wurde bislang offensichtlich von keinem Hersteller umgesetzt, obwohl sie mit Vorteilen verbunden ist. Durch das zusätzliche Bauteil lassen sich die Vorteile des Konzeptes der eingelegten Klappe (unkritischer Bördelprozess der Fronthaube) mit denen der aufgelegten Klappe (Kotflügel ohne Hinterschnitte) verbinden. Des Weiteren ergibt sich die Möglichkeit, den Frontscheinwerfer in das neue Bauteil zu integrieren und als Baugruppe am Fahrzeug zu montieren. Dadurch verringert sich der Einstellaufwand des Scheinwerfers, da dieser nun unabhängig von Kotflügel und Fronthaube ausgerichtet wird. Als nachteilig erweisen sich z. B. der zusätzliche Fertigungs- und Montageaufwand durch das neu hinzugekommene Bauteil.

#### 4.1.5 Ideenfindung durch nichttechnische Assoziation

Ein weiteres anschauliches Beispiel für die Nutzung von Analogien im Lösungsprozess ist bei GRAMANN [Gra04, S. 85 ff.] zu finden. Er beschreibt ein Konzept für ein Antriebssystem im Anlagenbau. Das System, auf das GRAMANN referenziert, dient der Beschleunigung größerer Wellen. Es besteht aus einem Elektromotor und einem zuschaltbaren Getriebe. Bei den beschriebenen Anlagen besteht ein Trend zur Verwendung größerer Wellen und höherer Drehzahlen. Beide Faktoren münden in der Forderung nach stärkeren Motoren. Dementgegen steht die Tatsache, dass die Elektromotoren in der Anlage einen erheblichen Kostenfaktor darstellen. Zudem sind die verfügbaren Motoren nur in definierten Leistungsstufen erhältlich. Diese Stufensprünge werden mit zunehmender Leistung größer, daher lassen sich die Motoren nur schlecht auf die spezifischen Anforderungen der Anlage abstimmen.

Beim Anfahren eines solchen Systems muss ein Losbrechmoment überwunden werden. Dieses Moment resultiert aus den hydrodynamischen Gleitlagern<sup>5</sup>, die aus Kostengründen in der Anlage verwendet werden. Bei der Dimensionierung der Motoren wird das Losbrechmoment zugrunde gelegt. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Motoren im Betrieb völlig überdimensioniert sind, da hier

<sup>5</sup> Bei hydrodynamischen Lagern muss zunächst die hohe Haftreibung zwischen Welle und Lager („St-St-Kontakt“) überwunden werden, bis sich ein Schmierfilm ausgebildet hat und nur noch Flüssigkeitsreibung besteht.

nur noch Flüssigkeitsreibung überwunden werden muss. Ziel des Projektes war es daher, ein Konzept zu entwickeln, das mit einem kleineren Antrieb auskommt.

Zur Lösung dieses Problems erwies sich eine Analogie als hilfreich. GRAMANN schreibt: „Um sich das vorliegende Systemverhalten besser vorstellen zu können, wurde die rotatorische Bewegung in eine translatorische übersetzt. Die Beschleunigung der Welle aus dem Stillstand ähnelte in ihrem Verhalten also einem mit einem Fahrzeug zu überwindenden Berg mit anfänglich sehr steiler Steigung, die kurz darauf deutlich abnimmt [...]. Durch diese Analogie wurde das vorliegende Problem auf ein alltägliches zurückgeführt, für das man auch eine quantitative Vorstellung hat. Im vorliegenden Fall boten sich im Wesentlichen also zwei Strategien an: 'Schwung holen' vor dem steilen Stück oder 'Zurückschalten'“ [Gra04, S. 86].

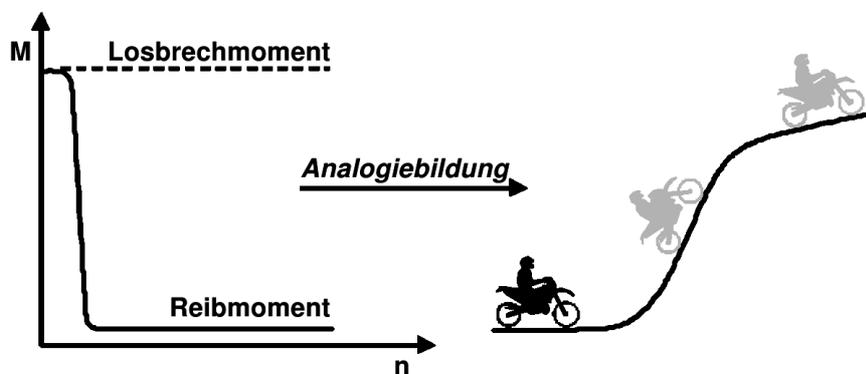


Bild 4.7: Momentenbedarf der Welle über der Drehzahl (links) und gebildete Analogie (rechts) [Gra04, S. 87]

Die im Analogiesystem gefundenen Strategien ließen sich auf die Problemstellung übertragen. Hinsichtlich der Strategie „Schwung holen“ kann z. B. mit einem kleineren Motor ein Schwungrad beschleunigt werden, das seine Energie bei Erreichen der Nenndrehzahl auf die stehende Welle überträgt. Durch den Ruck, der dabei entsteht, bricht die Welle los.

## 4.2 Exkurs in die Analogielehre

Die Beispiele zeigen, dass Analogien im Produktentwicklungsprozess vielfältig Verwendung finden. Sie dienen dem Entwicklungsteam als Kommunikationsmittel, sie fördern das Verständnis einer Problemstellung und zeigen neue Lösungswege auf. Oft werden sie auch gezielt bei der Formgestaltung eines Produktes eingesetzt, um beim Kunden bestimmte Assoziationen hervorzurufen<sup>6</sup>.

Der Begriff der Analogie wird im Schrifttum der Produktentwicklung und der Bionik in der Regel benutzt, ohne ihn zu definieren. Auch in dieser Arbeit wurde er bereits häufiger gebraucht, ohne dass er näher beleuchtet wurde. Für die weiteren Ausführungen ist es jedoch hilfreich zu verstehen, was

<sup>6</sup> Eine solche „äußere Ähnlichkeit“ wird vom Marketing als Verkaufsargument genutzt. Sie kommt in „griffigen Begriffen“ wie *VW-Käfer* oder *WC-Ente* zu Ausdruck.

Analogie ist und wie sie funktioniert. Ein kurzer Exkurs in die Analogielehre soll helfen, dieses Verständnis zu schaffen. Wegen des Umfangs der Thematik müssen die Ausführungen an dieser Stelle skizzenhaft und unvollständig bleiben. Für weiterführende Darstellungen sei der Leser auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen.

### 4.2.1 Analogien aus philosophischer Sicht

Analogie ist ein Prinzip unserer sprachlichen Welterfassung [Kun98, S. 14]. Bereits die Philosophen des antiken Griechenlands machten oft Gebrauch von ihr. Über die Zeiten hinweg entstand „eine ungeordnete Sammlung metaphysischer<sup>7</sup>, ontologischer<sup>8</sup>, semantischer und logischer Modelle, die sich mit dem Namen 'Analogie' verknüpfen“ [Kun98, S. 17]. Analogie ist dabei stets „eine nützliche Gehilfin, die selten ins Rampenlicht tritt“ [Kun98, S. 15].

Die Analogielehre unterscheidet zwischen *Attributionsanalogie* und *Proportionalitätsanalogie*. Die Attributionsanalogie ist eine Beziehung zwischen Gegenständen, die mit dem selben sprachlichen Ausdruck bezeichnet sind und die durch *verschiedene Beziehungen* zu einem *Identischen* definiert werden. So lässt sich z. B. jedes der im Bild 4.8 dargestellten Objekte durch die Attribute „Körper“ und „3 Dimensionen“ beschreiben. Dennoch handelt es sich um verschiedene Körper, die die Dimensionen des Raumes in unterschiedlicher Art und Weise ausfüllen. Proportionalitätsanalogie hingegen herrscht dann, wenn die Gegenstände eine *identische Beziehung* zu *Verschiedenem* aufweisen [Kun98, S. 109]. Das Bild 4.9 verdeutlicht dies an zwei Objekten und ihren Beziehungen zwischen einem Teil von ihnen und ihrem Ganzen. Diese Beziehung ist identisch, doch die Objekte und ihre Teile unterscheiden sich.

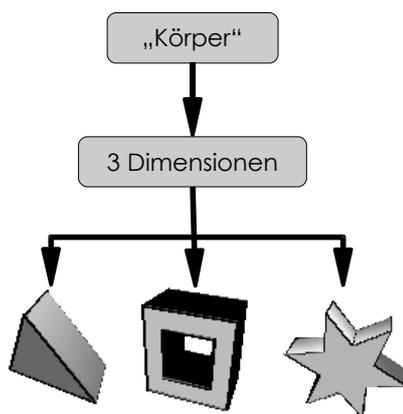


Bild 4.8: Beispiel für die Attributionsanalogie [Kun98, S. 112]

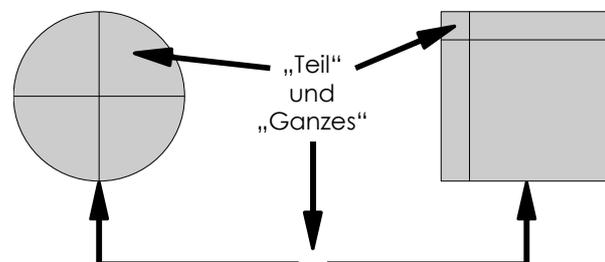


Bild 4.9: Beispiel für Proportionalitätsanalogie [Kun98, S. 119]

7 Die Metaphysik ist die Grunddisziplin der Philosophie. Sie behandelt die Beschaffenheit der Welt und ihre zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten.

8 Die Ontologie ist eine Disziplin der Philosophie, die sich primär mit dem Sein in all seinen Formen beschäftigt.

Vereinfacht lässt sich feststellen, Attributionsanalogie besteht in der Identität des Bezugsobjektes, während Proportionalitätsanalogie die Identität des Verhältnisses von Verhältnissen beschreibt. Die Attributionsanalogie lässt sich nutzen, um Dinge zu klassifizieren. Die Proportionalitätsanalogie hingegen bildet die Grundlage für den Analogieschluss.

Attributionsanalogie und Proportionalitätsanalogie erscheinen grundverschieden. Tatsächlich treten sie jedoch häufig komplementär auf, d. h. eine Analogie ist je nach Betrachtungsweise entweder das eine oder das andere. Hierfür sei als Beispiel die analoge Gegenüberstellung von Wespe und Injektionspritze gegeben. Aus Sicht der Proportionalitätsanalogie verhält sich der Stachel der Wespe wie die Nadel zur Spritze. Auf der andere Seite lassen sich Wespe und Injektionspritze als Dinge beschreiben, die mit ihrer Spitze in andere Objekte eindringen können. Diese Teilhabe an einer gemeinsamen Eigenschaft ist ein Kennzeichen der Attributionsanalogie.

Analogievergleiche haben in der Wissenschaft eine lange Tradition. Der Analogieschluss steht nach HOLZ in der Mitte zwischen dem logisch strengen Vernunftschluss und einer Wahrscheinlichkeitsüberlegung [Hol73, S. 61 zitiert in Kun98, S. 37]. Eine Beweiskraft wird ihm jedoch nicht zuerkannt. Analogien bilden die loseste Form der Einheit und vageste Form der Erkenntnis [Kun98, S. 50]. Sie sind somit für die Modellbildung relevant. Bei der Bildung von Modellen wird ein Zusammenhang, der im Modell gilt, auf einen Zusammenhang in der Wirklichkeit übertragen. Die Fragerichtung zielt dabei auf eine Erklärung der Wirklichkeit ab [Hol73, S. 54 zitiert in Kun98, S. 37].

Analogien halten Perspektiven fest. Die Vergangenheit zeigt, dass die Nutzung von Analogien häufig mit der Gefahr verbunden ist, Schlussfolgerungen, die aufgrund der Analogie gezogen werden, unbewusst auf Aspekte auszuweiten, die außerhalb der Gültigkeit der Analogie liegen. Dieser „Missbrauch“ von Analogien führt zu Verwirrung und Fehlinterpretationen. Er leitet letztlich das Denken in die Irre und mündet in falschen Schlussfolgerungen. TIEMANN benennt hierzu Beispiele aus der Entstehungsgeschichte bekannter physikalischer Modelle und Theorien [Tie93, S. 61 ff.]. Er konstatiert, dass in der Vergangenheit Physiker oft geneigt waren, anfangs erfolgreiche Analogien unbedingt in die endgültige Theorie übernehmen zu wollen. Nicht selten erlagen sie der Versuchung, anschauliche Modellvorstellung für die Realität zu halten. TIEMANN kommt zu dem Schluss: *„Um ein noch unbekanntes Feld der Naturwissenschaft und insbesondere der Physik zu erobern, ist es zunächst sinnvoll, von schon geklärten Phänomenen und gesicherten Theorien Vorstellungen zu entleihen und auf die neuartigen Probleme analog anzuwenden. [...] Die herkömmlichen Vorstellungen müssen zuletzt fallen gelassen werden, damit sich das substantiell Neue des Phänomenbereichs entpuppen kann“* [Tie93, S. 63 f.].

Ein Analogievergleich beinhaltet stets Differenz und Identität. HARRÉ stellt deshalb heraus, dass der sinnvolle Einsatz von Analogien immer mit einem Abwägen von Ähnlichkeit und Unähnlichkeit ver-

bunden sein sollte [Har81, S. S.172 zitiert in Kun98, S. 43]. Da eine Analogie praktisch ‚*jeder dienliche Zusammenhang*‘ [Hol73, S. 54 zitiert in Kun98, S. 37] sein kann, ist es um so wichtiger, die Grenzen der Analogie zu kennen. TIEMANN stellt jedoch fest, dass Ingenieure in vielen Fällen Analogien bilden, ohne diese zu hinterfragen. Bei der Wahl von Begriffen gehen sie pragmatisch vor, ohne dabei die erkenntnistheoretischen Konsequenzen zu berücksichtigen. Dies ist jedoch nur solange legitim, wie die Analogie nicht dem Verständnis eines Sachverhaltes dient. Die Nutzung von Analogien sollte dem jeweiligen Verwendungszweck angemessen sein. Die praktische Verwertbarkeit ist daher das Kriterium für einen erfolgreichen Analogiegebrauch [Tie93, S. 36].

### 4.2.2 Analogien aus psychologischer Sicht

Die Bildung von Analogien ist eng mit dem Denken verbunden und deshalb auch Bestandteil der psychologischen Forschung. Analogien werden aufgrund von Assoziationen gebildet. ARISTOTELES stellte drei Gesetze auf, mit denen er die Entstehung von Assoziationen zu erklären versuchte [May79, S. 10]:

- Das *Gesetz der Kontiguität* besagt, dass Ereignisse oder Objekte, die zeitlich oder räumlich gleichzeitig wahrgenommen werden, im Gedächtnis verknüpft gespeichert werden.
- Das *Gesetz der Ähnlichkeit* geht davon aus, dass Ereignisse oder Objekte, die ähnlich sind, miteinander assoziiert werden.
- Das *Gesetz der Gegensätzlichkeit* besagt, dass Ereignisse oder Objekte, die gegensätzlich sind, leicht miteinander assoziiert werden.

Die aristotelischen Gesetze bilden die Grundlage des *Assoziationismus*, der lange Zeit die Vorstellungen über das Denken dominierte. Erst mit der Nutzung empirischer Methoden zur Untersuchung der Denkprozesse gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde eine Reihe neuerer Theorien entwickelt, die sich z. T. nicht mit der Assoziationslehre vereinbaren ließen. Der Widerspruch ist nach MAYER trotz neuer Ansätze wie der Gestaltpsychologie oder informationstheoretischer Modelle bei weitem noch nicht gelöst [May79, S. 16].

Aus kognitionspsychologischer Sicht haben Analogien vor allem Bedeutung für das Lernen und Problemlösen. HESSE unterscheidet zwischen *analogem Zuordnen*, *analogem Verstehen* und *analogem Problemlösen*<sup>9</sup> [Hes91, S. 13 f.]. Die genannten Analogiearten bauen aufeinander auf. So beinhaltet analoges Verstehen analoges Zuordnen. Analoges Problemlösen wiederum ist mehr als analoges Verstehen. Analoges Problemlösen ist dadurch gekennzeichnet, dass ein bestimmtes Problem und dessen Lösung bereits bekannt sind. Wird der Problemlöser mit einem neuen Problem konfrontiert, dass eine

---

<sup>9</sup> Zusätzlich führt HESSE *Metaphern* auf, die er aber wegen ihre linguistischen Anteile nicht weiter berücksichtigt.

Ähnlichkeit zum bekannten Problem aufweist, wird er versuchen, das neue Problem durch einen analogen Transfer der bekannten Lösung zu bewältigen [Hes91, S. 199]. Nach GICK & HOLYOAK [GH83 in Hes91, S. 200 ff.] gestaltet sich dieser Transfer als *mapping process*, bei dem der Problemlöser versucht, die einzelnen Aspekte der beteiligten Analoga in Übereinstimmung zu bringen. Die Basis für den Transferprozess bildet das *Schema*. Dabei handelt es sich um ein abstraktes Grundprinzip, das beiden Problemen gemeinsam ist. Neben den übereinstimmenden Aspekten findet der Problemlöser eine Reihe von Elementen, die nicht miteinander korrespondieren. GICK & HOLYOAK unterscheiden hier zwischen *strukturerhaltenden Differenzen* und *strukturverletzenden Differenzen*. Letztere machen die Analogie unvollständig und in bestimmten Fällen, nämlich dann, wenn sie die kausalen Relationen des Schemas verändern, auch unbrauchbar.

### 4.2.3 Analogiearten

Im Schrifttum wird zwischen verschiedenen Analogiearten unterschieden. Oft genannt werden die *Direkte Analogie*, die *Persönliche Analogie* und die *Symbolische Analogie* [Cro94, S. 40 f.; Gam96, S. 96 ff.]. Direkte Analogien finden dort Anwendung, wo eine existierende Lösung „direkt“ auf ein Problem übertragen werden kann<sup>10</sup>. Die Bionik wird häufig als Beispiel für die Anwendung Direkter Analogien genannt. Persönliche Analogien sind Phantasieprodukte. Dabei versetzt man sich in das System, bei dem ein Problem zu lösen ist, und fragt sich z. B. *Was würde ich tun, wenn ich die Abgasanlage des PKWs wäre?* Der Perspektivenwechsel, der dadurch erreicht wird, kann zur Problemlösung beitragen. Zu den Symbolischen Analogien werden vor allem Metaphern und symbolhafte Umschreibungen gezählt. Durch die Umformulierung und Verfremdung treten oft neue Aspekte zutage, die bei der Problemlösung helfen können.

Neben den oben aufgeführten Analogiearten werden im Schrifttum noch weitere genannt (z. B. *Genotypische* und *Phänotypische Analogien* oder *Technik-* und *Natur-Analogien* [Hil98a, S. 120 ff.]). Eine klare inhaltliche Abgrenzung der einzelnen Analogien fällt schwer, zumal die Übergänge zwischen ihnen in der Regel fließend sind und darüber hinaus z. T. identische Sachverhalte mit unterschiedlichen Bezeichnungen belegt werden. So können *Strukturelle* und *Funktionelle Analogien* [Hil98a, S. 124 f.] der Direkten Analogie zugeordnet werden und eine Symbolische Analogie kann zugleich eine Technik-Analogie sein. Ungeachtet dieser Tatsache lassen sich die Analogiearten wie folgt klassifizieren:

- Die Analogieart bezeichnet den *Bereich, in dem die Analogie angesiedelt* ist. Beispiele hierfür sind die Natur-Analogie und die Technik-Analogie.

<sup>10</sup> Der Begriff *Direkte Analogie* ist irreführend, denn wie bei allen Analogien ist es auch hier erforderlich, die aus der Analogie entstandenen Ideen im Hinblick auf die Problemstellung zu interpretieren. Eine *direkte* Übertragung ist nur Ausnahmefällen möglich.

- Die Analogieart bezeichnet die *Art der Übereinstimmung*, die durch die Analogie beschrieben wird. Die Funktionelle Analogie und die Strukturelle Analogie sind Beispiele hierfür.
- Die Analogieart fokussiert auf die *methodische Sicht*. Beispiele für diese Klasse sind Persönliche Analogien und Figürliche Analogien.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass durch die Nutzung von Analogien oft kreative Lösungen entstehen. Es verwundert daher nicht, dass im Rahmen der Kreativitätsforschung eine Reihe von Werkzeugen entstanden sind, die die methodische Bildung von Assoziationen und Analogien fördern sollen.

### 4.3 Analogiebildung in der Produktentwicklung

Die Bedeutung der Analogiebildung für die Produktentwicklung wurde anhand der einführenden Beispiele dieses Kapitels bereits deutlich. Nach dem Exkurs in die Analogielehre soll in diesem Abschnitt der Einfluss von Analogien in der Produktentwicklung vertiefend betrachtet werden. Dazu wird untersucht, wie Analogien und Kreativitätstechniken zusammenhängen und welche Bedeutung Analogien in Bezug auf das Konzept der Wiederverwendung haben. Des Weiteren wird dargestellt, wann und in welchem Umfang der Produktentwickler auf das Werkzeug „Bionik“ zurückgreift.

#### 4.3.1 Analogien und Kreativitätstechniken

Die Fähigkeit, Analogien bilden zu können, ist Teil der menschlichen Kreativität. Kreativität ist dem Menschen zwar angeboren, doch sie lässt sich in vielfältiger Weise beeinflussen. PREISER & BUCHHOLZ beschreiben in ihrem *Grundmodell der „fünf P“* den kreativen Prozess und seine Einflussfaktoren [PB00, S. 17 ff.]. Die „fünf P“ stehen dabei für das *Problem*, den *Prozess*, die *Person*, das *Problemmumfeld* und das *Produkt*. Da sich die Kreativität in einem „*vielschichtigen Geflecht von Bedingungen, Einflußfaktoren und Denkvorgängen*“ [PB00, S. 17] vollzieht, lässt sie sich nicht in herkömmlichen Sinn lehren und lernen. Dennoch ergeben sich aus diesem Netzwerk vielfältige Ansatzpunkte zur Förderung von Kreativität. Für eine ausführliche Darstellung sei der Leser auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen [Csi01; Gam96; PB00].

Eine Möglichkeit, den kreativen Prozess zu fördern, stellt die Nutzung von Kreativitätstechniken dar. Dabei handelt es sich „*um Spielregeln und Methoden zur Förderung kreativer Einfälle*“ [PB00, S. 21]. Sie dienen dazu, Denkblockaden zu überwinden und das Blickfeld zu erweitern. Dadurch werden Lösungen, die bisher nicht wahrgenommen wurden, sichtbar. Da Kreativitätstechniken die Ideenfindung unterstützen, haben sie in der Produktentwicklung einen festen Platz. Denkpsychologische Untersuchungen zeigen, dass bei der Ideenfindung sowohl intuitive und als auch diskursive

Denkvorgänge ein Rolle spielen [Dör79; PB93]. Während das intuitive Denken in der Regel unbewusst abläuft, handelt es sich bei dem diskursiven Denken um ein bewusstes Vorgehen. Beim intuitiven Denken werden die vorhandenen Informationen während der Inkubationsphase<sup>11</sup> bewertet, verglichen und miteinander in Beziehung gesetzt. Das Ergebnis äußert sich oft als plötzlicher Einfall. Beim diskursiven Denken hingegen wird das Problem in Denkschritten gelöst. Die Lösung erfolgt hier systematisch.

Die oben dargestellten Erkenntnisse flossen auch in die Entwicklung der Kreativitätstechniken ein. So gibt es Techniken, die mehr das diskursive Denken unterstützen, und andere, die mehr das intuitive Denken fördern. Eine Übersicht der für die Produktentwicklung relevanten Kreativitätstechniken und ihrer Einordnung ist bei GAUSEMEIER ET AL. [GEK01, S. 123] zu finden. Das Ordnungsschema in Bild 4.10 stellt zudem dar, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, mit Hilfe einer bestimmten Kreativitätstechnik innovative Produktideen zu finden.

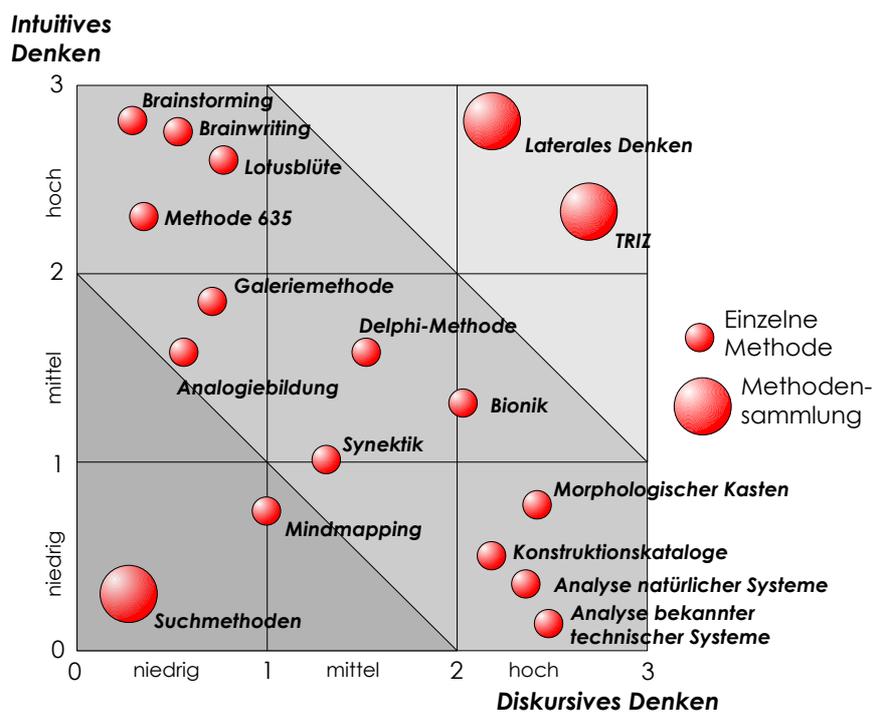


Bild 4.10: Ordnungsschema für Kreativitätstechniken und die Wahrscheinlichkeit, innovative Produktideen zu generieren [GEK01, S. 123]

Zu den Kreativitätstechniken zählt, wie dem Bild 4.10 zu entnehmen ist, auch die Analogiebildung. Nach PREISER & BUCHHOLZ läuft die „Analogie-Technik“ in drei Phasen ab [PB00, S. 154 f.]. Zunächst werden Analogien zum Thema kritiklos zusammengetragen. Gesucht werden dabei Parallelen zu anderen „möglichst verschiedenen Lebensbereichen“. Als mögliche Analogiegeber werden Natur, Technik, Gesellschaft, Freizeit-, Pflanzen-, Fabel-, Science Fiction- oder Romanwelt, eigene und

<sup>11</sup> In Analogie zu der Zeit zwischen Infektion und Ausbruch einer Krankheit bezeichnet die Inkubationsphase im Bereich der Problemlösung die Phase, in der man sich nicht bewusst mit dem Problem beschäftigt, sondern scheinbar abschaltet [PB00, S. 141].

fremde Kulturen oder Symbole genannt. Die gesammelten Analogien werden in einem zweiten Schritt bewertet. Hierbei werden die Analogien von verschiedenen Seiten mit dem Ziel beleuchtet, sinnvolle Ansätze für die Problemlösung zu finden. In einem dritten Schritt werden diese bevorzugten Analogien auf das Problem übertragen. PREISER & BUCHHOLZ machen darauf aufmerksam, dass die Merkmale der Analogie dabei nicht starr auf das Problem bezogen werden sollten, und dass gerade „hinkende“ Vergleiche neue Perspektiven aufzeigen können.

Eine Kreativitätstechnik, die in besonderem Maß von Analogien Gebrauch macht, ist die Synektik<sup>12</sup>. Hierbei handelt es sich um eine Methode, mit der das Fremdartige vertraut und das Vertraute fremd gemacht werden wird. Nach GAMBER werden bei einer Synektik-Sitzung folgende Schritte durchlaufen [Gam96, S. 100 ff.]:

- *Problemstellung*: Während dieser Phase wird das Problem an die Gruppe herangetragen und dort ausführlich diskutiert, bis jeder Teilnehmer ein umfassendes Verständnis des Problems gewonnen hat.
- *Spontanreaktion*: Im Rahmen eines Brainstorming werden erste Lösungsansätze generiert. Das Ziel dieser Phase ist es jedoch nicht, eine abschließende Lösung hervorzubringen, vielmehr bilden die ersten Ideen die Grundlage für den nächsten Schritt.
- *Neuformulierung*: In dieser Phase werden die gesammelten Ideen geordnet. Mit ihrer Hilfe wird das Problem schrittweise abstrahiert und auf seine Hauptursachen zurückgeführt.
- *Bilden von Analogien*: Während dieser Phase versucht man, sich von dem Problem zu lösen. Durch die Bildung von Analogien wird das Problem immer weiter verfremdet und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt.
- *Anwenden der Ideen*: Die letzte Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass sämtliche Einfälle und Betrachtungsmerkmale auf die Problemstellung zurückgeführt und angewendet werden.

Die Bildung von Analogien kann einerseits, wie oben dargestellt, als eigene Methode verstanden werden, andererseits ist sie aber auch ein grundlegendes Prinzip von Kreativitätstechniken<sup>13</sup>. Analogien beruht auf Assoziationen und Vergleichen; beides gilt als elementar für unser Denken. Sie finden sich (zumindest in Teilen) bei jeder Kreativitätstechnik. Die Bildung von Analogien lässt sich bei der Patentrecherche ebenso nachweisen wie beim Brainstorming. Analogien sind der Grund, dass ein Produktentwickler, der am Wochenende die klemmende Kellertür mit Schwung öffnet, plötzlich weiß, wie er sein Reibungsproblem lösen wird. Sie bewirken auch, dass ein Erfinder, der danach re-

---

<sup>12</sup> Der Begriff Synektik ist vom griechischen *synecticos* abgeleitet und bedeutet soviel wie Zusammenfügen von verschiedenartigen, anscheinend nicht zusammenhängenden Elementen [Gam96, S. 168].

<sup>13</sup> Nach PREISER & BUCHHOLZ [PB00, S. 21] gibt es fünf Prinzipien von Kreativitätstechniken. Hierzu zählen die *Freie Assoziation, Bildhaftigkeit, Analogien, Verfremdung und Zufallsanregung* sowie die *Systematische Variation*.

cherchiert, wie eine Hub- in eine Drehbewegung umgesetzt werden kann, das Prinzip eines Kugelschreibers als mögliche Lösung erkennt [VDI03].

### 4.3.2 Analogien und das Konzept der Wiederverwendung

SMITH & DUFFY [SD01] gehen davon aus, dass Produktentwickler in jedem Stadium des Entwicklungsprozesses auf bekanntes Wissen und Erfahrungen zurückgreifen. Sie sehen das Konzept der Wiederverwendung als dem Prozess innewohnend. Dies führt z. T. sogar dazu, dass der Produktentwickler versucht, auch dann existierende Lösungen zu nutzen, wenn es darum geht, vollkommen neue Funktionen zu erfüllen [Fin98 zitiert in SD01, S. 227].

Die Wiederverwendung bekannter Lösungen wird vor allem von der Hoffnung getrieben, Kosten-, Zeit-, Qualitäts- und Leistungsvorteile zu erzielen [DF99, S. 803]. Eine Lösung, die bereits einmal durchdacht wurde und sich bewährt hat, ist mit weniger Risiken verbunden als eine neu entwickelte Lösung. MOSTOW ET AL. machen jedoch darauf aufmerksam, dass eine existierende Lösung, die 99 Prozent der neuen Aufgabe erfüllt, weitaus mehr als 1 Prozent Aufwand für die Nacharbeit verlangt, um die gestellte Aufgabe zu 100 Prozent zu erfüllen [MBW93 zitiert in SD01, S. 229]. Sie stellen daher die Frage, ob es in bestimmten Fällen nicht sinnvoller wäre, die Lösung von Grund auf neu zu konzipieren, anstatt eine vorhandene zu modifizieren. Andererseits ist bekannt, dass generell die „letzten 20 Prozent“ der Lösung einer Aufgabe etwa 80 Prozent des Gesamtaufwandes ausmachen, während die ersten 80 Prozent des Ergebnisses mit etwa 20 Prozent des Aufwandes erreicht werden können [Koc04]. Es kann angenommen werden, dass diese als *Pareto-Prinzip* bekannte Faustformel sowohl für die Neukonzeption einer Lösung als auch für die Modifikation einer vorhandenen Lösung zutrifft (Bild 4.11).

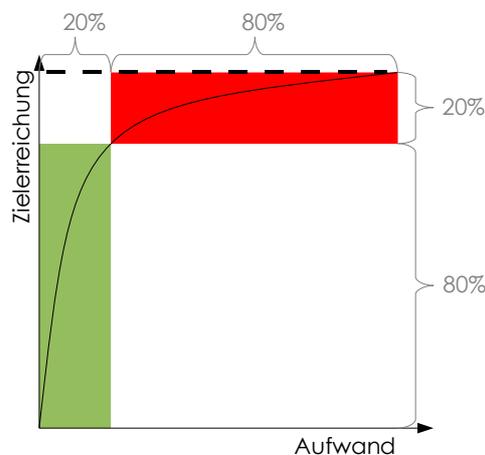


Bild 4.11: 80/20-Regel – das Pareto-Prinzip

Der Aspekt der Wiederverwendung wird im Schrifttum der Produktentwicklung in mehrerlei Hinsicht diskutiert. Genannt seien hier Beiträge zur Akquise, Repräsentation und Speicherung von Produkt-

und Prozesswissen [YC99; DCP01], zum modularen Aufbau von Produkten [LJP+03] sowie zum Wissens- und Erfahrungstransfer zwischen Produktentwicklern [BSW01]. So erlauben z. B. die Notizbücher von Produktentwicklern einen Blick auf die „*ungefilterte Geschichte*“<sup>14</sup> eines Entwicklungsprojektes. Werden „elektronische Notizbücher“ genutzt, lassen sich die Informationen (theoretisch) durch geeignete Techniken (*information retrieval*) extrahieren und aufbereiten, um sie nachfolgenden Projekten zugänglich zu machen.

Es zeigt sich jedoch, dass der Prozess einer solchen „Wissensakquise“ alles andere als trivial ist. Ursache hierfür ist u. a. die große Vielfalt an unterschiedlichen Daten (Notizen, Skizzen, Berechnungen, CAD-Daten etc.), die während einer Produktentwicklung generiert werden und die sich nur schwer in *einer* Struktur darstellen lassen. Des Weiteren sind die Daten, die vom Produktentwickler vor allem am Beginn eines Entwicklungsprojektes erzeugt werden, meist unscharf und ihre Interpretation vom jeweiligen Kontext abhängig (Bild 4.12).

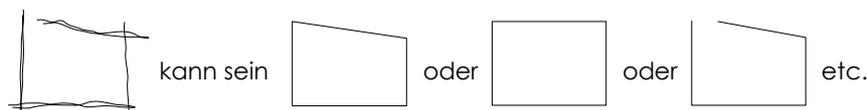


Bild 4.12: Mehrdeutige Skizze [LDL01]

Der Umgang mit unscharfen Daten und ihre korrekte Interpretation ist für Computer trotz jahrzehntelanger intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auch heute noch nicht unproblematisch. So wurden im Rahmen der KI-Forschung<sup>15</sup> zwar Computerprogramme entwickelt, die – meist unter Verwendung von Zufalls- und Wahrscheinlichkeitskomponenten – in der Lage sind, Analogien zu bilden und Ähnlichkeiten aufzudecken. Diese Lösungen existieren bislang allerdings nur für bestimmte Anwendungsfälle<sup>16</sup>. Ein Durchbruch auf dem Gebiet der softwareunterstützten Analogiebildung ist bis dato nicht gelungen.

Die Erfassung unscharfer Daten, ihre Speicherung und Repräsentation als *exakte* Datenstruktur im Computer ist jedoch nur ein Aspekt, bei dem Assoziationen und Ähnlichkeiten für die Produktentwicklung eine Rolle spielen. Im umgekehrten Fall müssen die exakten Daten auch „unscharf gefunden werden“. Hierzu ein Beispiel: Ein Produktentwickler bekommt den Auftrag, einen Einlasskanal für einen Zylinderkopf zu entwickeln. Der Einlasskanal muss bestimmten Zielkriterien (Massenstrom, Drall) genügen. Zudem sind bei der Entwicklung eine Reihe von Randbedingungen (Bauraum, maximaler Druckverlust, etc.) zu beachten. Der Produktentwickler weiß, dass er in der Vergangenheit bereits das CAD-Modell eines Kanals modelliert hat, bei dem die Zielkriterien und die

<sup>14</sup> „... providing a rich, unfiltered history of a design project“ [YC99, S. 143]

<sup>15</sup> KI – Künstliche Intelligenz

<sup>16</sup> HOFMEISTER spricht in diesem Zusammenhang gar von „hochgradig beschränkten Mikrobereichen“ [Hof96, S. 15]. Seines Erachtens erfolgte die Entwicklung der Software vor allem unter dem Aspekt der Theoriebildung. Vorrangiges Ziel der Forschung war es demnach, ein Modell des menschlichen Denkens zu schaffen.

Randbedingungen *ähnlich* waren. Er will daher auf dieses Einlasskanalmodell zurückgreifen und es modifizieren. Das Kanalmodell hat er, so wie es in seinem Unternehmen üblich ist, in einem PDM-System gespeichert, einem System, das der Verwaltung von Produktdaten dient. Damit ist jedoch auch ein Problem verbunden, denn heutigen PDM-Systemen fehlt meist die Möglichkeit einer detaillierten Suche nach produktdefinierenden Daten [VJ04]. Zwar existiert in der Regel eine Klassifizierung nach Teile- oder Zeichnungsnummern. Für eine assoziative Datensuche, die Metadaten, wie Zielkriterien, Randbedingungen, Wirkprinzipien o. ä. einschließt, ist dies jedoch nicht ausreichend. Für die Suche im Datenbestand der Systeme sind im allgemeinen scharfe Begriffe oder Daten notwendig. Die Suche nach vorhandenen technischen Systemen sollte jedoch der Denkweise des Konstrukteurs entsprechen und mit einer „gewissen *Toleranz und Unschärfe erfolgen*“ [Cle05, S. 132].

Die notwendige Technologie zur Erweiterung bestehender Systeme um derartige Funktionen ist hinlänglich bekannt und wird an anderer Stelle bereits erfolgreich eingesetzt. So lässt sich z. B. die Suche nach bestimmten Begriffen durch sogenannte Wildcards oder Jokerzeichen unterstützen. Mit ihrer Hilfe lassen sich auch Begriffe finden, die nur zu einem Teil mit der Schreibweise des gesuchten Begriffes übereinstimmen. Eine weitere Möglichkeit stellt die phonetische Suche dar. Sie ermöglicht die Suche nach Begriffen, die ähnlich wie der Suchbegriff *klingen*. Eine einfache unscharfe Suche lässt sich auch dadurch erreichen, dass statt exakter Zahlenwerte *von-bis*-Bereiche für die Suche verwendet werden. Darüber hinaus ist es denkbar, das Suchziel mit Hilfe von Toleranzkurven zu definieren (Bild 4.13).

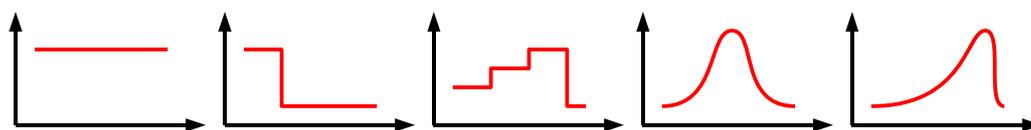


Bild 4.13: Mögliche Toleranzkurven als Abhängigkeit von Wertebereich (horizontal) und Trefferwahrscheinlichkeit

Die Grundlage für die oben dargestellten z. T. trivialen „Erweiterungen“ bilden Ähnlichkeitsbeziehungen. Durch das „Aufweichen“ der Suchbegriffe wird zwar eine höhere Trefferanzahl erreicht, gleichzeitig werden jedoch auch vermehrt solche Lösungen gefunden, die mit der gesuchten nur wenig gemein haben. Eine Einschränkung auf wirklich relevante Lösungen kann z. B. dadurch erreicht werden, dass die unscharfe Suche auf mehrere Kriterien, die durch *und*-Verknüpfungen verbunden sind, ausgedehnt wird (Bild 4.14).

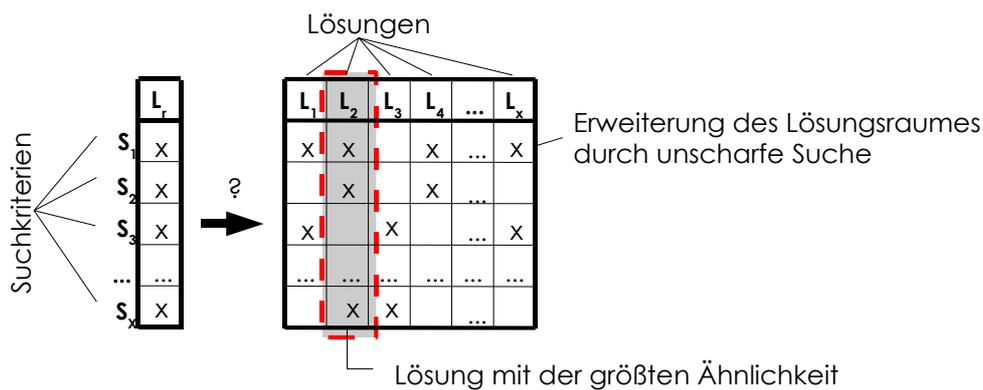


Bild 4.14: Eingrenzung des Lösungsraumes durch Nutzung weiterer Suchkriterien

Die Suche nach ähnlichen Bauteilen oder Lösungen zum Zweck ihrer Wiederverwendung hat, wie einleitend dargestellt wurde, für die Produktentwicklung eine große Bedeutung. Im Gegensatz zu den Kreativitätstechniken erfolgt die Suche nach Ähnlichkeiten und Analogien hier jedoch rechnerunterstützt. Die verwendeten Algorithmen müssen daher einerseits eine unscharfe Suche erlauben und den Lösungsraum erweitern, andererseits im erweiterten Lösungsraum die relevante Dinge herausfiltern können. Bei Begriffen und Zahlen gelingt dies bereits zuverlässig und so existieren inzwischen unzählige Programme, die es z. B. Kunden oder Vertriebsmitarbeitern ermöglichen, in einer Datenbank eines Unternehmens nach bestimmten Produkten und Produktkonfigurationen zu suchen. Die Datenbanksuche ist in diesen Fällen jedoch auf ausgewählte und wohldefinierte Suchkriterien beschränkt. Für die frühen Phasen einer Produktentwicklung ist eine solche Suche jedoch nicht zuletzt deshalb ungeeignet, weil die Sprache des Produktentwicklers mehr umfasst als Zahlen und Begriffe und weil eine Restriktion der Suchkriterien in dieser Phase hinderlich ist. Der verwendete Suchalgorithmus sollte vor allem auf die Arbeitsergebnisse, die in diesen Phasen generiert werden (Notizen, Skizzen, 3D-Geometrien), zurückgreifen und diese interpretieren können. In den letzten Jahren hat sich in diesem Gebiet einiges getan. So sind z. B. Programme verfügbar, die in der Lage sind, in einem Datenbestand nach ähnlichen Zeichnungen oder ähnlichen 3D-Geometrien [PW06] zu suchen. Ein Suchwerkzeug, das den Sinn einer Anfrage „versteht“ und das Zusammenhänge deutlich werden lässt, ist bislang jedoch noch nicht realisiert.

### 4.3.3 Lösungsfindung und das Werkzeug „Bionik“

Die Ausführungen oben machen deutlich, dass die Bildung von Analogien und Ähnlichkeitsbetrachtungen wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung sind. Sie lassen sich – wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung – in allen Phasen der Produktentwicklung identifizieren. Doch wie passt die Bionik in dieses Bild? Wann nutzt der Produktentwickler das Werkzeug „Bionik“? Welche Gründe sprechen für und gegen seine Verwendung? Welche Voraussetzung müssen gegeben sein, um die

Bionik in der Produktentwicklung einsetzen zu können? Zur Beantwortung dieser Fragen soll im Folgenden der Ablauf einer Lösungsfindung kurz umrissen werden.

Wird der Produktentwickler mit einer Problemstellung konfrontiert, hat er meist recht schnell eine grobe Vorstellung von der Lösung, die er realisieren möchte. Dieser *erste Lösungsansatz*<sup>17</sup> basiert auf dem Wissen, der Erfahrung und nicht zuletzt auch auf der Intuition des Produktentwicklers. Unter Umständen kann der erste Lösungsvorschlag bereits sehr konkret sein und ein klares Ziel vermitteln [PB93, S. 92]. Der Produktentwickler ist dann geneigt, die Suche nach weiteren Lösungsmöglichkeiten einzustellen und die zuerst gefundene Lösung auszuentwickeln. Zudem wird der Produktentwickler zunächst prüfen, ob er in der Vergangenheit Lösungen entwickelt hat, die seiner Zielvorstellung ähnlich sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass er dabei etwas Verwertbares findet, ist relativ hoch, stellen doch Anpassungs- und Variantenkonstruktionen die Mehrzahl der heutigen Konstruktionsaufgaben dar [Ehr95, S. 217].

In der Regel handelt es sich bei dem ersten Lösungsansatz um einen von vielen weiteren. Die beschriebene Vorgehensweise des Produktentwicklers, den nächstbesten Lösungsansatz aufzugreifen und weiterzuentwickeln, kann als opportunistisch<sup>18</sup> bezeichnet werden. Sie führt in der Regel zu schnellen, jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zu nicht optimalen Ergebnissen [Cle05, S. 59]. Der Produktentwickler ist daher angehalten, bei seiner Arbeit (auch) systematisch vorzugehen, um einer vorzeitigen *Lösungsfixierung* entgegenzuwirken und die Lösungsqualität zu verbessern<sup>19</sup>.

Die systematische Suche nach weiteren Lösungsmöglichkeiten kann durch die Anwendung von Kreativitätstechniken unterstützt werden. Hierbei handelt es sich, wie bereits dargestellt, um Methoden, die die Bildung von Assoziationen fördern und so zu neuen unkonventionellen Ideen führen sollen. Häufig werden dabei gruppendynamische Effekte genutzt. PAHL & BEITZ [PB93, S. 95] weisen darauf hin, dass Kreativitätstechniken in der Regel dann eingesetzt werden, wenn

- noch kein realisierbares Lösungsprinzip vorliegt,
- das physikalische Geschehen einer möglichen Lösung noch nicht erkennbar ist,
- das Gefühl vorherrscht, mit bekannten Vorschlägen nicht weiterzukommen,
- eine völlige Trennung vom Konventionellen angestrebt wird.

Die genannten Punkte treffen vor allem bei der Entwicklung neuer Produkte zu. Neukonstruktionen kommen jedoch – wie bereits mehrfach angeführt wurde – im Alltag des Produktentwicklers relativ

---

<sup>17</sup> Es handelt sich dabei in der Regel um eine schemenhafte Beschreibung der endgültigen Lösung. Ein solcher Ansatz wird daher auch als „*Lösungsmuster*“ [Cle05, S. 67] oder als „*Protoidee*“ [LZ02, S. 118] bezeichnet.

<sup>18</sup> Gelegenheiten nutzend, auch unter Aufgabe von Grundprinzipien

<sup>19</sup> Die Vorgehensweise des Produktentwicklers kann auch als ein Wechsel zwischen opportunistischen und systematischen Tätigkeiten beschrieben werden [Cle05, S. 60].

selten vor. Des Weiteren scheint der Einsatz von Kreativitätstechniken nicht immer das rechte Mittel zu sein, zumal auch durch Gespräche und kritische Diskussionen mit Kollegen Anregungen und neue Lösungsansätze entstehen können [PB93, S. 93]. Bei einem solchen Gedankenaustausch ist darüber hinaus die „Ausbeute an brauchbaren Ideen“ wesentlich höher als bei den Kreativitätstechniken, wo – bedingt durch die Methode – die Entstehung einer Vielzahl unsinniger Lösungen gefördert wird.

Der erste Lösungsansatz mag zwar nicht zur optimalen Lösung führen, doch er kann als Arbeitsgrundlage und als Keimzelle für die weitere Entwicklung dienen. Zum einen ist es denkbar, dass der Produktentwickler seine Zielvorstellung von der Lösung nutzt, um *ähnliche Lösungen* zu ermitteln, zum anderen kann er nach *ähnlichen Problemstellungen* fragen und prüfen, inwiefern die Lösungen für diese Problemstellungen übertragbar sind.

Im ersten Fall der lösungsorientierten Herangehensweise kann aus der ersten Idee das zugrunde liegende Konzept extrahiert werden [GEK01, S. 130]. Es dient als Ausgangspunkt für die Suche nach alternativen Lösungswegen. Eine Möglichkeit hierzu stellt die Methode des Konzeptdreiecks dar. Das Bild 4.15 zeigt die Methode am Beispiel der Suche nach weiteren Lösungen, um bei gleichem Materialeinsatz der Durchbiegung eines Balkens entgegenzuwirken.

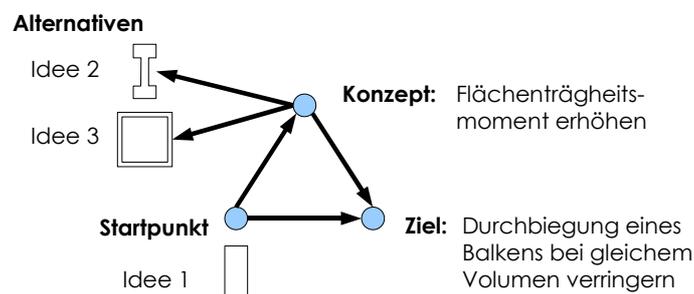


Bild 4.15: Konzeptdreieck für das Problem, die Durchbiegung eines Balkens zu verringern [GEK01, S. 130]

Bei der problemorientierten Herangehensweise werden bisherige Lösungen prinzipiell in Frage gestellt. Dabei wird geprüft, ob das Problem tatsächlich als solches auftritt oder ob es nicht umgangen oder „undefiniert“ werden kann. Ist die Lösung des Problems „umgänglich“, wird gezielt nach alternativen Konzepten gesucht.

Unterstellt man dem Produktentwickler ein ökonomisches Verhalten, kann angenommen werden, dass er bei seiner Suche zunächst in solchen Gebieten recherchieren wird, in denen ähnliche Lösungen und Problemstellungen zu erwarten sind<sup>20</sup>. So wird er z. B. verwandte Technikbereiche nach Verwertbarem durchsuchen, lassen sich doch erfahrungsgemäß die Lösungen solcher „nahen“ Probleme mit hoher Wahrscheinlichkeit ohne übermäßigen Änderungsaufwand in die zu bearbeitende Problemstellung übertragen.

<sup>20</sup> ALTSCHULLER [Alt84] bezeichnet die Suche in vertrauten Lösungsfeldern als „psychologischen Trägheitsfaktor“. Er führt dieses Verhalten auf eingefahrene Denkmuster zurück.

Ist das Ergebnis dieser Suche nicht befriedigend, wird der Produktentwickler die Problemstellung noch mehr abstrahieren und in fachlich weiter entfernten Bereichen nach Anregungen suchen (müssen). Spätestens hier ist der Einsatz von Kreativitätstechniken sinnvoll. In einer solchen Situation erfolgt die Lösungssuche meist über Fachbereiche hinweg (transdisziplinär). Sie schließt nun auch solche Bereiche der Technik ein, in denen auf den ersten Blick keine Lösungen für das Problem zu erwarten sind; sie umfasst die Recherche nach nutzbaren physikalischen Prinzipien, klopft Geistes- und Sozialwissenschaften nach dort bekannten Gesetzmäßigkeiten ab; und sie macht nicht Halt vor der Biologie und den Lösungen der Natur.

Die Bionik ist ein typischer Vertreter einer transdisziplinären Lösungsfindung. Sie stellt heute im Alltag des Produktentwicklers ein selten genutztes Werkzeug dar, das „die meiste Zeit im Schrank liegt“<sup>21</sup>. Sie kommt einem „letzten Ausweg“ gleich, der nur dann beschritten wird, wenn andere näher liegende Pfade nicht zum Ziel führen. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich dies in Zukunft ändern wird. Die Produkte von morgen werden komplexer sein. Schon heute ist ein Trend zur Entwicklung komplexer technischer Systeme zu beobachten, bei denen ein reibungsfreies Zusammenspiel verschiedener Fachrichtungen (Maschinenbau, Steuer- und Regelungstechnik, Elektronik und Softwaretechnik) notwendig wird [GEK01, S. 33]. Darüber hinaus sehen sich die Unternehmen zunehmend dem Zwang ausgesetzt, sich vom Wettbewerb differenzieren zu müssen [GEK01, S. 164]. Sie sind gezwungen, die Dinge „anders zu machen“, wollen sie ihren Wettbewerbsvorsprung erhalten.

Mit der Bionik tut sich ein großes Feld alternativer Lösungen auf. Diese Lösungen sind nicht nur anders, sondern – korrekt interpretiert und umgesetzt – oftmals auch besser. Um diesen Lösungspool „anzapfen“ zu können, muss er erforscht und verstanden sein. Es ist einsehbar, dass der Produktentwickler diese Aufgabe allein nicht leisten kann und die Unterstützung von Experten benötigt. Daraus folgt jedoch auch, dass er in der Lage sein muss, mit den Experten zu kommunizieren; eine Tatsache, die später noch weiter zu diskutieren sein wird.

#### 4.4 Thesen

Aus den Erläuterungen in diesem Kapitel wird die Bedeutung von Analogiebildung und Ähnlichkeitsbetrachtungen für den Produktentwicklungsprozess deutlich. Sie zeigen, dass der Produktentwickler in allen Phasen des Entwicklungsprozesses von Analogien profitieren kann. Während der Lösungsfindung können Analogien den Prozess entscheidend beeinflussen und die Entstehung innovativer Produkte fördern. Wie die Beispiele zeigen, entstammen die genutzten Analogien aus allen erdenklichen Bereichen. Vor diesem Hintergrund scheint es nicht zweckmäßig, Fragestellungen nach der

---

<sup>21</sup> In Anlehnung an ein Zitat von NACHTIGALL: „Bionik ist kein Allheilmittel und kein Glaubensbekenntnis. Bionik stellt ein Werkzeug dar. Man kann es benutzen, missbrauchen oder im Schrank liegen lassen, wie jedes andere Werkzeug.“ [Nac98a, Vorwort]

Übertragung von Denkweisen, Konzepten oder Lösungen allein auf die Bionik zu beschränken. Für die folgende theseförmige Zusammenfassung wird daher der interdisziplinäre Lösungstransfers in allgemeiner Form betrachtet.

**These 1:** Der Rückgriff auf ähnliche Lösungen und bekannte Sachverhalte ist wesentlicher Bestandteil eines jeden Produktentwicklungsprozesses. Der fachübergreifende Transfer von Erkenntnissen bildet die Grundlage für technischen Fortschritt und Innovation.

Der Produktentwickler denkt und handelt ökonomisch. Er nutzt, wo immer dies möglich ist, bekannte Lösungen oder baut auf diesen auf. Dies kommt auch in dem relativ geringen Anteil „echter“ Neukonstruktionen zum Ausdruck. Ist eine Neukonstruktion erforderlich, versucht der Produktentwickler den Weg zur Lösung durch den Rückgriff auf „Elemente fremder Fachbereiche“ abzukürzen. Durch die transdisziplinäre Lösungssuche wird der Lösungsraum erweitert. Gleichzeitig steigt die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung neuer, unkonventioneller Ansätze. Diese Lösungsansätze stellen nicht selten den Ausgangspunkt für die Entwicklung innovativer Produkte dar. Die Erfahrung zeigt, dass Innovationen vor allem dort zutage treten, wo ein Bruch mit eingefahrenen Denkweisen erfolgt. In der Produktentwicklung geschieht ein solcher Paradigmenwechsel meist dann, wenn herkömmliche Vorgehensweisen keinen weiteren Fortschritt mehr erwarten lassen. Aus Sicht der Unternehmen führt der Wechsel der Paradigmen nicht selten in „unbekannte Gewässer“. Er ist mit Risiken verbunden und macht mühsam erworbene Kompetenzen obsolet. Der Zeitpunkt des „Umschwenkens“ sollte daher wohl überlegt sein.

**These 2:** Für die Identifizierung von Analogien ist es oft hilfreich, unbedarft an das Problem heranzugehen. Die Bewertung von Lösungsansätzen aus fremden Wissensdomänen hingegen setzt fundierte Kenntnisse sowohl des Bereiches, aus dem die Problemstellung stammt, als auch des Bereiches, in dem nach Lösungsansätzen gesucht wird, voraus.

Analogien bilden die Grundlage eines jeden transdisziplinären Lösungstransfers. Die Wahl des Analogiebereiches und die Auswahl der Analogie selbst erfolgt – auch wenn sie methodisch durch Kreativitätstechniken unterstützt wird – meist zufällig. Dabei werden ähnliche Sachverhalte aufgrund wenigstens eines übereinstimmenden Merkmals in Beziehung gesetzt.

Die Erfahrung zeigt, dass Analogien häufig von solchen Leuten gefunden werden, die unbedarft an ein Problem herantreten und die sich zuvor nicht oder nur oberflächlich mit der Thematik beschäftigt haben. Die Denkanstöße, die sie liefern, müssen jedoch in einem weiteren Prozess detailliert betrachtet und bewertet werden. So ist in der Produktentwicklung ein fachübergreifender Transfer von Lösungsansätzen und Erkenntnissen nur dann möglich, wenn die Sachverhalte der beteiligten Wissensdomänen dem Produktentwickler prinzipiell bekannt sind und auch verstanden wurden. Ihre Kenntnis

versetzt den Produktentwickler überhaupt erst in der Lage, relevante Analogiebereiche zu identifizieren und zweckmäßige Analogien zu bilden.

Die Anregung durch Analogiebildung kann auf verschiedenen Stufen erfolgen. Zum einen ist es denkbar, dem Denken durch oberflächliche Anstöße eine neue Richtung zu geben. So können z. B. durch die bewusste Verwendung von Metaphern Blockaden gelöst werden. Ihre Doppeldeutigkeit und die Inkongruenz zwischen Metapher und Kontext fördern einen Interpretationsprozess, der einen neuen Blick auf den Sachverhalt eröffnet. Daneben sind in der Produktentwicklung auch solche Analogien zu finden, die ein tiefes Verständnis des Sachverhaltes erfordern. Im Unterschied zur oberflächlichen Anregung steht hier die Frage nach dem *Warum* im Vordergrund. Das Hinterfragen eines als analog angenommenen Lösungsansatzes, seiner Struktur und seiner genauen Funktionsweise sowie der geltenden Randbedingungen hilft dem Produktentwickler abzuschätzen, welcher Teil der Analogie übertragbar ist und welcher nicht. Eine besonders fundierte Kenntnis des Bereiches, aus dem die Problemstellung stammt, als auch des Bereiches, in dem nach Lösungsansätzen gesucht wird, ist daher erforderlich.

**These 3:** Produkte und Prozesse sind durch eine wachsende Komplexität gekennzeichnet. Die Entstehung von Innovationen durch einen fachübergreifenden Wissenstransfer wird zukünftig verstärkt von der Einbindung fachfremder Experten in den Produktentwicklungsprozess abhängen. Die fachübergreifende Kommunikation gewinnt in diesem Zusammenhang zunehmend an Bedeutung.

Wie in These 2 bereits dargestellt wurde, können *zweckmäßige* Analogien nur dann gefunden werden, wenn der Problemlöser sowohl Kenntnisse des Bereiches, aus dem die Problemstellung stammt, als auch Kenntnisse des Bereiches, in dem nach Lösungsansätzen gesucht wird, besitzt. Darüber hinaus ist für ein tiefer gehendes Verständnis des Sachverhaltes nicht selten Expertenwissen notwendig. Diese Kenntnisse gehören in der Regel nicht zum Allgemeinwissen, so dass es erforderlich wird, das Entwicklungsteam durch Experten zu ergänzen.

Aus Sicht der Produktentwicklung ist das Hinzuzuziehen von Experten zum Entwicklungsteam nicht neu. In der Produktentwicklung ist ein Trend hin zu einer ganzheitliche Betrachtungsweise zu beobachten. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Aspekte steigt kontinuierlich an und machen es zunehmend notwendig, Fachleute, die erst zu einem späteren Zeitpunkt mit dem Produkt in Berührung kommen, frühzeitig mit in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Die Experten, die heute üblicherweise in eine Produktentwicklung involviert sind, sind in der Regel Kunden, Produktplaner, Zulieferer, Vertreter von Marketing und Vertrieb, Fertigung und Montage oder Service und Wartung. Sie haben eine relativ enge Bindung zum Produkt. Sollen dem Entwicklungsteam jedoch, wie oben dargestellt wurde, Informationen fremder Wissensdomänen zur Verfügung gestellt werden, so

werden solche Experten hinzugezogen, die bislang nicht am Produktentwicklungsprozess beteiligt waren. Diese Experten gehören in der Regel dem Unternehmen nicht als Mitarbeiter an. Sie sind „Externe“, die dazu relativ „produktfern“ denken und agieren. Aus dieser Tatsache ergeben sich für den Produktentwicklungsprozess gewisse Barrieren, die überwunden werden müssen, wenn ein fachübergreifender Transfer von Wissen und Lösungsansätzen erreicht werden soll.

**These 4:** Der Informationspool fremder Wissensdomänen wird nur dann erfolgreich in der Produktentwicklung genutzt, wenn dieses Wissen in geeigneter Weise bereitgestellt und übertragen wird. Eine methodische Unterstützung des Prozesses durch geeignete Werkzeuge und Hilfsmittel ist hierzu unabdingbar.

Die Suche nach geeigneten Lösungsansätzen in fremden Wissensdomänen und die Bildung von zweckmäßigen Analogien setzen, wie in These 2 dargestellt, Kenntnisse der beteiligten Fachgebiete voraus. Je spezieller die zum Verständnis eines Sachverhaltes benötigten Kenntnisse sind, desto weniger kann vorausgesetzt werden, dass sie zum Allgemeinwissen des Produktentwicklers gehören und desto größer wird die Bedeutung, dem Produktentwickler dieses Wissen bereitzustellen. Zwar können, wie in These 3 dargestellt, Experten als „Informationsquelle“ dienen, jedoch muss der Wissenstransfer zwischen Entwicklungsteam und Experten methodisch unterstützt und geleitet werden.

Darüber hinaus kann nicht davon ausgegangen werden, dass in einem Unternehmen zu jeder Zeit ein Experte mit entsprechenden Fachkenntnissen zur Verfügung steht. Deshalb ist es sinnvoll, neben einer methodischen Unterstützung der interdisziplinären Kommunikation, vor allem nach solchen Möglichkeiten zu suchen, die nicht die Anwesenheit von Experten erfordern. Die Werkzeuge und Methoden müssen dabei nicht nur die Recherchetätigkeit unterstützen, sie haben auch die Aufgabe, den Produktentwickler für ein fremdes Fachgebiet zu sensibilisieren und die Ideenfindung zu stimulieren. Die Aneignung detaillierter Kenntnisse des fremden Wissensgebietes kann zwar durch ein Selbststudium erfolgen, doch dieser Weg ist für den Produktentwickler wenig hilfreich. Ein Produktentwickler, der diesen Weg gehen wollte, wäre zum einen gezwungen, sich die fachspezifische Terminologie anzueignen, zum anderen müsste er „zwischen den Zeilen lesen“, um die für ihn relevanten Informationen herauszufiltern. Da Aufwand und Nutzen einer solchen Vorgehensweise in keinem sinnvollen Verhältnis stehen, ist es notwendig, nach alternativen Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung des Transferprozesses zu suchen.

Im Schrifttum der Produktentwicklung und der Bionik sind Fragestellungen dieser Art bislang nur ansatzweise zu finden. Ein fachübergreifender Wissenstransfer wird hier oft nur am Rande im Zusammenhang mit Kreativitätstechniken, Wissensmanagement und gruppendynamischen Effekte diskutiert. Die vorliegende Arbeit will dazu beitragen, diese „Lücke“ zu schließen. Dazu wird zu-

nächst ein Modell entwickelt, mit dem sich die Bildung von Analogien im Produktentwicklungsprozess erklären lässt. Das Analogiemodell dient zum einem dem Verständnis der Vorgänge und bildet zum anderen die Grundlage für eine weiterführende methodische Unterstützung im darauffolgenden Teil der Arbeit.

*“Bionik lernen“ heißt „Kommunizieren lernen“.*

*DEANE HARDER*

## **5 Modelle für das bionische Arbeiten**

Die Bionik wurde in dem vergangenen Kapitel vor allem als Werkzeug für die Lösungsfindung charakterisiert. Sie sollte jedoch nicht als „Sonderfall“ der Analogiebildung betrachtet werden. Analogiebildung findet in der Regel in der Gedankenwelt einer Einzelperson statt. Sie spielt beim Erfassen komplexer Zusammenhänge, beim Lernen und beim Problemlösen eine Rolle. Analogien können kommuniziert und anderen Personen vermittelt werden. Sie sind essentiell für das bionische Arbeiten. Doch Bionik ist weit mehr als Analogiebildung. Sie ist eine wissenschaftsverbindende Fachrichtung und Forschungsdisziplin. Die Fragestellungen, die sich mit der Bionik verbinden, sind daher andere als die der Analogieforschung.

Bionik ist nur dann erfolgreich, wenn es gelingt, das Wissen der Biologie, das für die Lösung der Problemstellung relevant ist, dem Produktentwickler bereitzustellen. Der Wissenstransfer wird jedoch durch historisch gewachsene Barrieren zwischen den Wissenschaftsdisziplinen behindert. In diesem Kapitel wird untersucht, wie der Wissenstransfer zwischen Biologie und Technik stattfinden kann. Der Fokus auf die Bionik hat zwei Gründe. Zum einen ist die Bionik, wie bereits dargestellt wurde, in den letzten Jahren zunehmend in das Zentrum des öffentlichen Interesses gerückt. Sie ist somit ein „recht bekanntes Untersuchungsobjekt“. Zum anderen liegen neben den zahlreichen Publikationen, die das Ergebnis einer erfolgreichen Übertragung biologischer Lösungsprinzipen in die Technik beschreiben, auch einige Ansätze vor, die sich dem Übertragungsprozess selbst widmen. Diese Modelle werden im folgenden Kapitel vorgestellt und diskutiert. Darauf aufbauend werden zwei Modelle entwickelt. Zum einen handelt es sich dabei um ein Analogiemodell, mit dem die Bildung von zweckmäßigen Analogien in der Produktentwicklung erklärt und zugleich unterstützt werden kann, zum anderen um ein Modell, das die Kommunikation zwischen Fachexperten und Produktentwicklern beschreibt. Bei der Entwicklung der Modelle wurde zwar der Wissenstransfer zwischen

Biologie und Technik in besonderer Weise betrachtet, dennoch sind die Modelle nicht auf die Bionik beschränkt. In ihrer allgemeinen Form sind sie für jeden interdisziplinären Wissenstransfer gültig.

## **5.1 Übertragungsmodelle für die Bionik**

Es wurde bereits erwähnt, dass im Schrifttum der Bionik in erster Linie Forschungsergebnisse präsentiert werden. Der Weg, der zur Entstehung dieser Ergebnisse führte, wird dabei in der Regel nicht oder nur schemenhaft beleuchtet. Publikationen, die sich dem interdisziplinären Wissenstransfer und seiner methodischen Unterstützung widmen, können im Schrifttum der Bionik als Ausnahme betrachtet werden. Im Folgenden wird ein Überblick der wichtigsten Übertragungsmodelle gegeben. Eine Kritik der Ansätze erfolgt nach der Darstellung der Modelle am Ende des Kapitels.

### **5.1.1 Modell von HILL**

HILL bemängelt, dass sich Entwicklungsteams bislang zu wenig an den Lösungen der Natur orientieren. Er weist darauf hin, dass in der Produktentwicklung ein Paradigmenwechsel bevorsteht, *„der durch den Übergang von der naturentfremdeten zur naturverwandten Technik gekennzeichnet ist“* [Hil01, S. 244]. Der Produktentwickler ist gefordert, sich bei der Entwicklung von Produkten stärker an den Evolutionsgesetzmäßigkeiten, den Strukturen und den Organisationsformen biologischer System zu orientieren. Als möglichen Weg, die Entwicklung von naturorientierten und ökologisch wirksamen Konstruktionen systematisch zu betreiben, sieht HILL in der Integration von bionischem Denken und Handeln in den Konstruktionsprozess. Nach seiner Ansicht spielen in diesem Prozess die *Funktionsanalogie* eine entscheidende Rolle.

Am Beginn einer bionischen Lösungsfindung sieht HILL die Festlegung der Funktion, die das zu entwickelnde technische System erfüllen soll. Durch Analogiebildung werden in einem zweiten Schritt biologische Vorbilder gesucht, die diese Funktion erfüllen. Im letzten Schritt werden die gefundenen Prinzipien und Merkmale auf die technische Lösung übertragen. Das Bild 5.1 stellt die Schritte der bionischen Lösungsfindung grafisch dar.

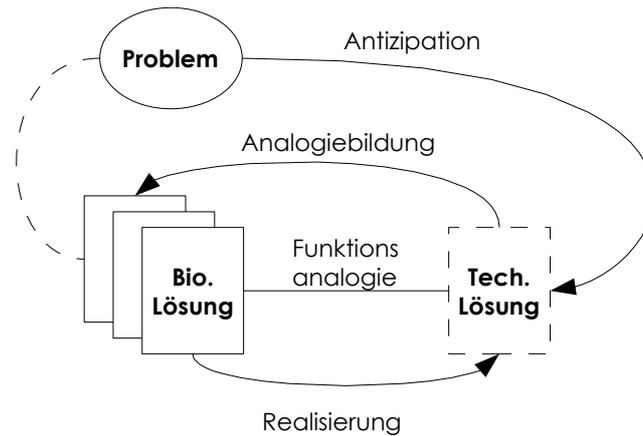


Bild 5.1: Analogiebildung in der Bionik [Hil98a, S. 52]

Zur Unterstützung des Übertragungsprozesses schlägt HILL vor, Kataloge biologischer Konstruktionen zu nutzen. Diese Kataloge beinhalten Grundfunktionen (z. B. Formen, Wandeln, Verbinden), die „aufgrund ihrer Abstraktion einen solchen Allgemeingrad, der sowohl für technische, als auch für biologische Systeme zutrifft“ [Hil98a, S. 2], besitzen. HILL weist darauf hin, dass es weniger auf die Exaktheit der Umsetzung, sondern vielmehr auf die daraus entspringenden Inspiration ankommt [Hil01, S. 245]. Die Arbeit mit den Katalogen soll den Produktentwickler in eine lösungsträchtige Richtung lenken und ihm gleichzeitig die zur Gestaltung der Lösung notwendigen Spielräume offenhalten. Die Kataloge biologischer Konstruktionen werden im Kapitel 6.2.1 näher diskutiert.

### 5.1.2 Modell von KÜPPERS

KÜPPERS versteht sein Modell (Bild 5.2) gleichfalls als eine „Anleitung für bionisches Forschen und Entwickeln“ [KT02, S. 155]. Er sieht zwei Ausgangssituationen, die zu einer bionischen Entwicklung führen. Zum einen stellt die systematische Erforschung von Naturobjekten, -verfahren und -prinzipien, wie sie z. B. in der Biologie, Ökologie oder Physik stattfinden, einen möglichen Startpunkt dar. Die Erkenntnisse werden mit Ingenieuren „interdisziplinär diskutiert und ... auf ein technisches Problem abgebildet“ [KT02, S. 155]. KÜPPERS stellt heraus, dass eine solche Kommunikation oft zufällig stattfindet.

Der Beginn einer bionischen Entwicklung kann jedoch auch im Umfeld der Technik liegen. Wenn die Weiterentwicklung eines technischen Produktes nicht mehr oder nur mit erheblichem Aufwand erfolgen kann, sind Ingenieure eher bereit, „über den Tellerrand zu schauen“. In dem Modell von KÜPPERS stellt dieser Aspekt die „Ebene der gegenseitigen Erkenntnis“ dar. Ihr folgt die „Ebene der Technischen Biologie“, in der eine grundlegende Analyse und Recherche des biologischen Systems erfolgt. Diese ist Teil der „Ebene der Ingenieurtechnischen Bionik“, in der darüber entschieden wird, ob ein gefundener Ansatz weiterverfolgt werden soll oder nicht. Als Hilfsmittel zur Unterstützung der

Entscheidungsfindung schlägt KÜPPERS die sogenannte „*bioanaloge Ähnlichkeitsmatrix*“ (Bild 5.3) vor.

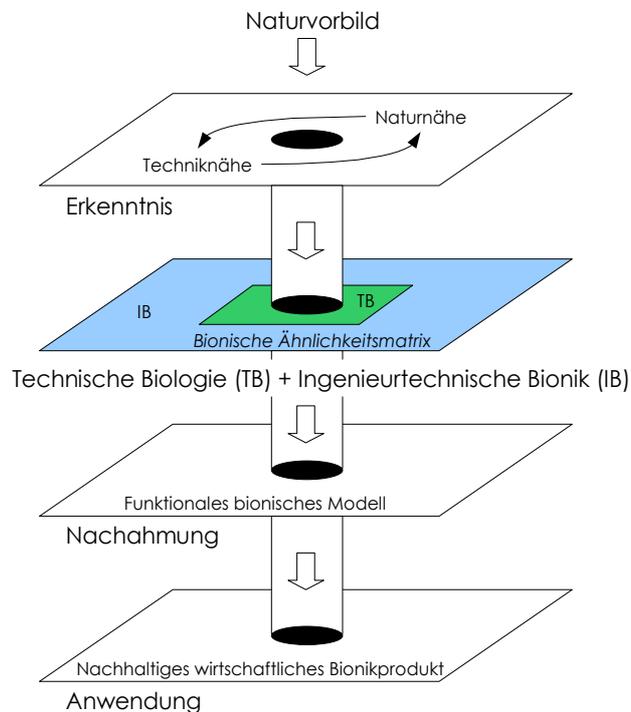


Bild 5.2: Anleitung für bionisches Forschen und Entwickeln [KT02, S. 161]

Auf der „*Ebene der Bionischen Nachahmung*“ wird detailliert nach den Möglichkeiten und Grenzen einer technischen Umsetzung geschaut. Berücksichtigt werden hier u. a. flexible Strukturen und mikrostrukturierte Materialien der Natur im Hinblick auf ihre technische Realisierbarkeit. Auch in dieser Ebene soll die bioanaloge Ähnlichkeitsmatrix bei der Gegenüberstellung und Entscheidungsfindung unterstützen. Die „*Ebene der Bionischen Anwendung*“ stellt in KÜPPERS Modell die vierte Ebene dar. Hier stehen Fragen nach der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit der entwickelten Lösung im Vordergrund. Es wird überprüft, ob die Vorteile der neuen Lösung es rechtfertigen, die konventionelle abzulösen.

Die oben erwähnte bioanaloge Ähnlichkeitsmatrix (Bild 5.3) bezeichnet keine Matrix im Sinne einer tabellenförmigen Darstellung. KÜPPERS beschreibt mit dem Begriff eine Vorgehensweise für eine algorithmisierte Suche, bei der geprüft wird, ob die biologische und die technische Seite hinsichtlich von *Gütekriterium*, *Funktion* und *Randbedingung* einander ähnlich sind. Nur dann ist nach KÜPPERS eine technische Nachahmung sinnvoll. Die genannten Begriffe charakterisiert KÜPPERS wie folgt [KT02, S. 157 f.]:

- Das **Gütekriterium** beschreibt in der Natur die Eigenschaften von Organismen, die ihre Überlebensfähigkeit beeinflussen; in der Technik sind es die Eigenschaften, die auf die Leistung bzw. die Qualität des Systems einwirken.
- Unter **Funktion** versteht KÜPPERS [KT02, S. 158] „eine oder mehrere Eigenschaften, die das biologische/technische Objekt oder Verfahren besitzt bzw. Zwecke, die es erfüllen soll.“<sup>1</sup>
- Zu den **Randbedingungen** zählen in der Natur alle Umwelteinflüsse, die trotz der vorherrschenden Dynamik als zeitlich und örtlich stabil angenommen werden; in der Technik sind es stabile Größen, die auf das Produkt oder das Verfahren einwirken.

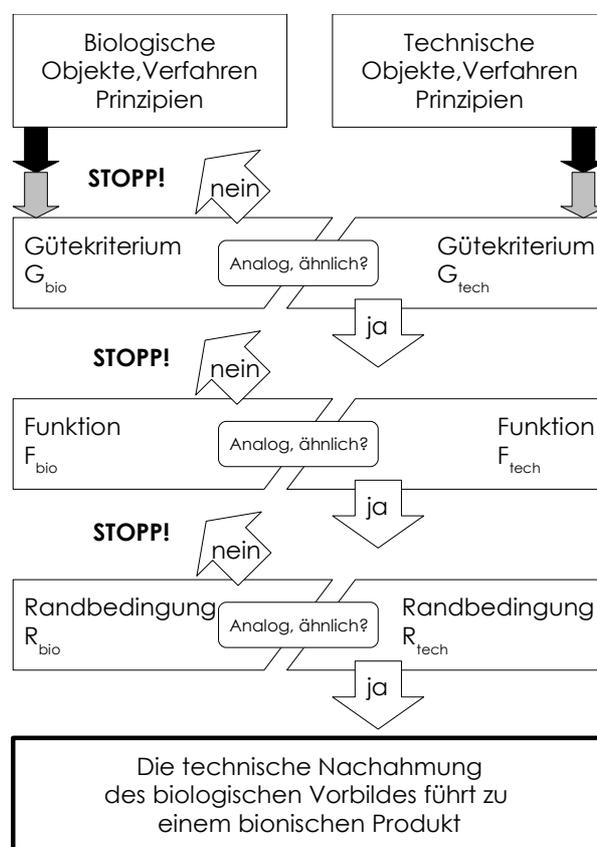


Bild 5.3: Bioanaloge Ähnlichkeitsmatrix [KT02, S. 157]

Eine ähnliche Vorgehensweise ist auch bei ZERBST [Zer87, S. 29] zu finden, wobei dieser eine andere Suchreihenfolge vorschlägt. ZERBST prüft zuerst, ob die Funktionen einander ähnlich sind, dann prüft er die Ähnlichkeit der Randbedingungen und abschließend die Vergleichbarkeit der Gütekriterien. Ob sich die beiden Suchalgorithmen aufgrund dessen in ihrer Effizienz unterscheiden, darf bezweifelt werden.

<sup>1</sup> Es fällt auf, dass KÜPPERS in diesem Zusammenhang nicht (wie in der Konstruktionsmethodik üblich) zwischen *Eigenschaften* und *Funktionen* unterscheidet.

GRAMANN weist auf eine Widersprüchlichkeit zwischen der angebotenen Suchstrategie und der Beschreibung der biologischen Prinzipien hin [Gra04, S. 71]. Die Suchstrategie engt den Lösungsraum in einer Weise ein, die letztlich nur für solche biologischen Vorbilder eine Übertragung vorsieht, die ein nahezu identisches Abbild der zu entwickelnden technischen Lösungen darstellen. Eine Übertragung auf abstrakter Ebene ist mit der Vorgehensweise daher nicht möglich.

### 5.1.3 SFT-Methode nach RUMMEL

RUMMEL macht deutlich, dass der Wissenspool der Biologie „in der vorliegenden Form für die technische Umsetzung nicht geeignet“ ist, da dieser in der Sprache der Biologen formuliert wurde [Rum04, S. 41]. Das Wissen ist im Schrifttum oft deskriptiv veröffentlicht und hat keinen Bezug zu einer möglichen technischen Nutzung. RUMMEL argumentiert daher, ein technisches Problem zunächst so umzukodieren, dass eine Lösung im Wissenspool gefunden werden kann. Ist die Suche erfolgreich, muss die gefundene biologische Lösung wiederum dekodiert und in die Sprache der Technik übertragen werden (Bild 5.4).

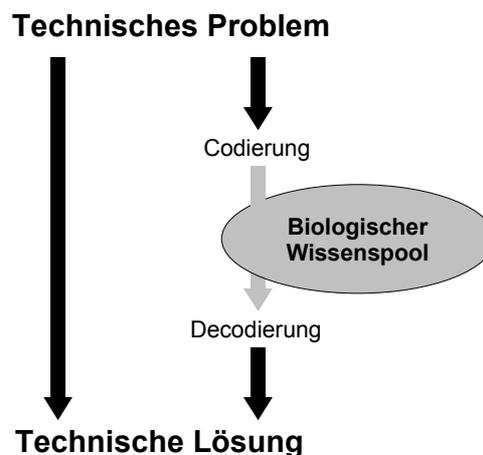


Bild 5.4: Nutzung des biologischen Wissenspools zur Lösung technischer Probleme [Rum04]

RUMMEL stellt eine Methode vor, die den Produktentwickler bei der Suche nach Lösungen der Natur unterstützen soll, ohne den gesamten Fundus der Natur sichten zu müssen. Er zieht dabei Vergleiche zu TRIZ und den Arbeiten von ALTSCHULLER [Alt73; Alt84]. TRIZ entstand aus der Motivation heraus, Strategien für die Lösung von Problemen zu entwickeln. Dazu wurde eine große Anzahl von Patenten gesichtet und im Hinblick auf Prinzipien untersucht, die allen gemeinsam waren. Die Ergebnisse wurden in eine Art und Weise formuliert, die für den Produktentwickler verwertbar sind (vgl. Kapitel 6.2.6). Die Bionik kann nach RUMMEL einen ähnlichen Weg gehen. Der interessierte Ingenieur wäre so nicht gezwungen, die Natur selbst nach ihren „Patenten“ zu durchsuchen und auszuwerten. Der Prozess der bionischen Lösungsfindung lässt sich demnach in drei Phasen unterteilen:

- *Sondierungsphase*: In dieser Phase wird der biologische Wissenspools mit der kodierten Aufgabenstellung nach der aussichtsreichsten biologischen „Hausnummer“ durchsucht.
- *Verifikationsphase*: Diese Phase beschreibt das Finden und das Qualifizieren der Lösung. Es wird überprüft, inwiefern eine Prinzipienübertragung möglich ist.
- *Umsetzungsphase*: Die dritte Phase umfasst die Bewertung der Lösung und ihren Transfer in die Technik.

Die beschriebenen Phasen bezeichnet RUMMEL kurz als *Suchen*, *Finden* und *Transfer*<sup>2</sup>. Er stellt heraus, dass Codierung und Decodierung wesentliche Bestandteile der Methode sind und in hohem Maß über Erfolg oder Misserfolg bestimmen. RUMMEL schreibt „*die Kernkompetenz liegt in der entwickelten Schnittstellensemantik*“ [Rum04, S. 43] und verweist auf von HILL [Hil04b] vorgeschlagenen Elementarfunktionen. Er detailliert nicht, wie die „Schnittstellensemantik“ im einzelnen gestaltet werden kann, so dass z. B. unklar bleibt, wie die Codierung der Problemstellungen und die Decodierung der gefundenen Lösungen erfolgen soll oder nach welchen Kriterien die Lösungen bewertet werden können.

RUMMEL vergleicht die Bionik mit anderen Kreativitätstechniken und kommt zu dem Schluss, dass die Phase der Verifikation „*das besondere an der Bionik ist*“ [Rum04, S. 45]. Er führt dies darauf zurück, dass mit der Bionik Lösungsansätze gefunden werden, die real vorhanden sind, und somit verifiziert werden können. Bei anderen Kreativitätstechniken, so RUMMEL, „*ist die entwickelte Neuerung ein 'imaginäres' Produkt*“. Diese Argumentation scheint so nicht schlüssig, denn die Erfahrung zeigt, dass der Produktentwickler häufig Lösungsansätze generiert, die ihm in anderer Form bereits bekannt sind. In diesem Fall muss geprüft werden, inwiefern der gefundene Ansatz zur Lösung der konkreten Problemstellung geeignet ist. Die Verifikationsphase kann somit im Gesamtprozess auch dann identifiziert werden kann, wenn andere (oder keine speziellen) Kreativitätstechniken angewendet werden.

BIRKE [Bir01] beschreibt ebenfalls die von RUMMEL vorgestellte SFT-Methode<sup>3</sup>. Darüber hinaus sieht er für die Übertragung des Naturprinzips auf die Aufgabenstellung folgende zwei Möglichkeiten:

- *Analoge Übertragungsmethode*: Die Übertragung erfolgt sehr nahe am Naturvorbild. Die gefundene biologische Lösung wird, soweit dies möglich und sinnvoll ist, auf die Aufgabe übertragen. Dies kann z. B. durch eine Skalierung der Lösung realisiert werden.

---

2 An anderer Stelle [RB06] werden die Phasen *Suchen*, *Qualifizieren*, *Analysieren* und *Transfer* genannt. Die Methode heißt dort entsprechend SQAT.

3 RUMMEL und BIRKE arbeiteten gemeinsam an einem neuen audiovisuellen Raumkonzept für die Oper in Oslo. Vgl. hierzu [Rum01; Bir01].

- *Abstraktionsprinzip*: Der Übertragung geht eine aufgabenbezogene Transformation des Naturprinzips voraus. Zur Lösung der Aufgabenstellung wird nicht das Naturvorbild selbst, sondern sein abstrahiertes Abbild genutzt.

Die Suche nach geeigneten Naturanalogien kann nach RUMMEL durch die Nutzung von erklärenden Umschreibungen des Sachverhaltes (Paraphrasen) gefördert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass Formulierungen gefunden werden, die einen allgemeinen Charakter haben und die ein geistiges Lösen von der Aufgabenstellung erlauben. Der Abstraktionsgrad ist so zu wählen, dass die gewählte Formulierung einerseits den Forderungen der Aufgabenstellung gerecht wird, andererseits das Lösungsfeld nicht bereits im Vorfeld einschränkt.

#### 5.1.4 Bionisches Vorgehensmodell nach GRAMANN

GRAMANN analysierte eine Reihe mit Studenten durchgeführter Fallstudien und findet „*einen verallgemeinerbaren und relativ konkret beschreibbaren Prozess bei der Lösungssuche mittels Bionik*“ [Gra04, S. 97]. Sein Modell stellt er als Flussdiagramm dar (Bild 5.5). Er charakterisiert die Handlungsabschnitte „*Formulieren des Suchziels*“, „*Zuordnung biologischer Systeme*“, „*Analyse der zugeordneten Systeme*“ und „*Technischen Umsetzung*“. Die Handlungsabschnitte werden durch entsprechende Entscheidungspunkte ergänzt. Auf diese Weise kann der Prozess iterativ durchlaufen werden. GRAMANN weist darauf hin, dass die effiziente und effektive Durchführung der einzelnen Abschnitte die eigentliche Schwierigkeit bei der Umsetzung darstellt [Gra04, S. 99].

Für die Suche nach Analogien schlägt GRAMANN vor, Formulierungen zu wählen, die die Randbedingungen oder die physikalische Problemstellung beschreiben. Zudem biete sich eine objektorientierte Fragestellung in der Form „*Welche Organismen existieren, die ...*“ an, da dies der Funktionsweise des menschlichen Gehirn entgegenkommt. Er weist darauf hin, dass die Art der Formulierung die Suchrichtung und damit auch Art und Anzahl der potentiellen Analogien beeinflusst. Abstraktere Formulierungen bieten hier in der Regel eine höhere Trefferquote.

Die Zuordnung der biologischen Systeme stellt für GRAMANN einen nicht zu unterschätzenden Teil bei der Lösungssuche mittels Bionik dar. Er konstatiert, dass bei den meisten Ingenieuren zwar ein gewisses Maß an biologischem Grundwissen aus der Schulzeit vorhanden ist; dieses ist jedoch bezogen auf die Problemstellung meist nur unzureichend und erschwert den Zugang zu potentiellen biologischen Vorbildern. Zur Unterstützung der Lösungssuche schlägt GRAMANN die Nutzung von Assoziationslisten (vgl. Kapitel 6.2.3) vor. Sie zeigen dem Anwender erfolgversprechende Suchrichtungen auf und erleichtern ihm so den Einstieg in die Recherche.

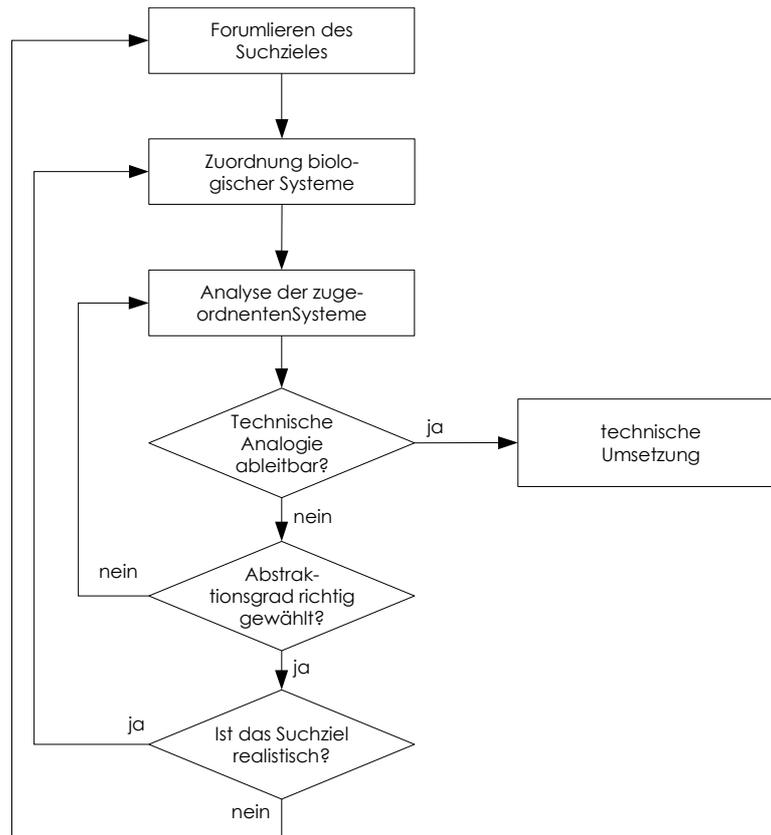


Bild 5.5: Bionischer Vorgehenszyklus nach GRAMANN [Gra04, S. 98]

Des Weiteren schlägt GRAMANN vor, die für gewöhnlich heterogene Zusammensetzung des Entwicklungsteams zu nutzen und durch Befragung der einzelnen Teammitglieder die Anzahl der gefundenen Assoziationen zu erhöhen. Gegebenenfalls können Experten<sup>4</sup> um Rat gebeten werden. Für Unternehmen kann es sinnvoll sein, zeitweilig einen Biologiestudenten zu beschäftigen, da dieser zum einen über ein wesentlich höheres Grundwissen verfügt, und zum anderen, weil er leichter Zugang zu weiterführender Literatur erhält und die „richtigen“ Ansprechpartner kennt.

Die Analyse der zugeordneten Systeme erfolgt auf „klassischem Weg“. GRAMANN nennt die Recherche im Internet, die Befragung von Experten und die Nutzung von Literatur als mögliche Informationsquellen. Er stellt fest, dass meist die für die technische Umsetzung notwendigen Informationen im Schrifttum der Biologie nicht vorhanden sind, so dass notfalls Versuche und Technische Biologie im Sinne von NACHTIGALL durchzuführen sind [Gra04, S. 101 f.]. Darüber hinaus zeigt die Erfahrung, dass es bei genauerer Betrachtung auch in scheinbar verstandenen biologischen Systemen noch viele offene Fragestellungen gibt, die beantwortet werden müssen, wenn die dem System zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Prinzipien technisch realisiert werden sollen. Eine „Nacharbeit“ seitens der biologischen Grundlagenforschung ist dann erforderlich (vgl. Kapitel 2.3).

<sup>4</sup> Als Experten bezeichnet GRAMANN in diesem Zusammenhang Personen mit einem höheren biologischen Grundwissen.

Die Frage nach der Realisierbarkeit einer gefundenen Analogie sollte interdisziplinär und gegebenenfalls unter Einsatz von Bewertungsmethoden beantwortet werden. Ist eine technische Umsetzung nicht möglich, schlägt GRAMANN vor, zunächst die Wahl des Abstraktionsgrades zu überprüfen. Scheint dieser korrekt gewählt, so ist zu prüfen, ob das Suchziel realistisch ist.

### 5.1.5 Ilmenauer Bionic Algorithm

SCHILLING ET AL. [SFM+05] stellen ebenfalls ein Modell einer bionischen Arbeitsweise vor. Ihr Modell, das in Bild 5.6 dargestellt ist, erklärt sich weitestgehend selbst. Die Autoren gehen in ihrem Ansatz von der VDI-Richtlinie 2221 aus, in der der generelle Ablauf einer Produktentwicklung beschrieben ist (vgl. Bild 3.1, S. 33). Zudem fließen die Überlegungen von NACHTIGALL, zwischen Technischer Biologie und Bionik zu unterscheiden (vgl. Bild 2.1, S. 11), in ihr Modell ein. Das Ziel der dargestellten Vorgehensweise ist es, den bestehenden Lösungsraum durch Ansätze, die aus der Biologie bekannt sind, zu erweitern. Hierzu schlagen SCHILLING ET AL. vor, ausgehend vom Zweck des zu entwickelnden Systems, Funktionen biologischer System zu ermitteln, die einen ähnlichen Zweck erfüllen. Die Suche nach biologischen Entsprechungen muss nach Ansicht der Autoren zwar im Wesentlichen vom Produktentwickler selbst durchgeführt werden, sie lässt sich jedoch durch einen „Analogie-Sucher“ unterstützen. SCHILLING ET AL. stellen sich hierunter ein Content-Management-System vor, das dem Produktentwickler den Zugang zu den biologischen Vorbildobjekten erleichtert (vgl. Kapitel 6.2.2).

Wurde ein biologisches Vorbild gefunden, das die gesuchte Funktion erfüllt, muss geprüft werden, inwiefern eine Übertragung in das technische Problemfeld möglich ist. Dieser Schritt ist notwendig, da in der Natur Ziele und Aufgaben im technischen Sinne nicht existieren. SCHILLING ET AL. konstatieren, dass ein Transfer nur dann sinnvoll ist, wenn die Zusammenhänge im biologischen System verstanden wurden. Die Autoren sehen daher vor der eigentlichen Übertragung Phasen der Modellbildung und der Prototypenbildung vor. Bevor der bionische Ansatz letztlich den bestehenden Lösungsraum erweitert und für die Lösung der technischen Problemstellung genutzt werden kann, müssen die Randbedingungen im technischen System und im biologischen Vorbildobjekt kritisch hinterfragt werden. Dabei ist z. B. zu überprüfen, ob zwischen den Analoga geometrische Ähnlichkeiten vorliegen, ob alternativer Materialien verwendet werden können, oder ob die zur Produktion des technischen Systems notwendigen Prozesse realisierbar sind.

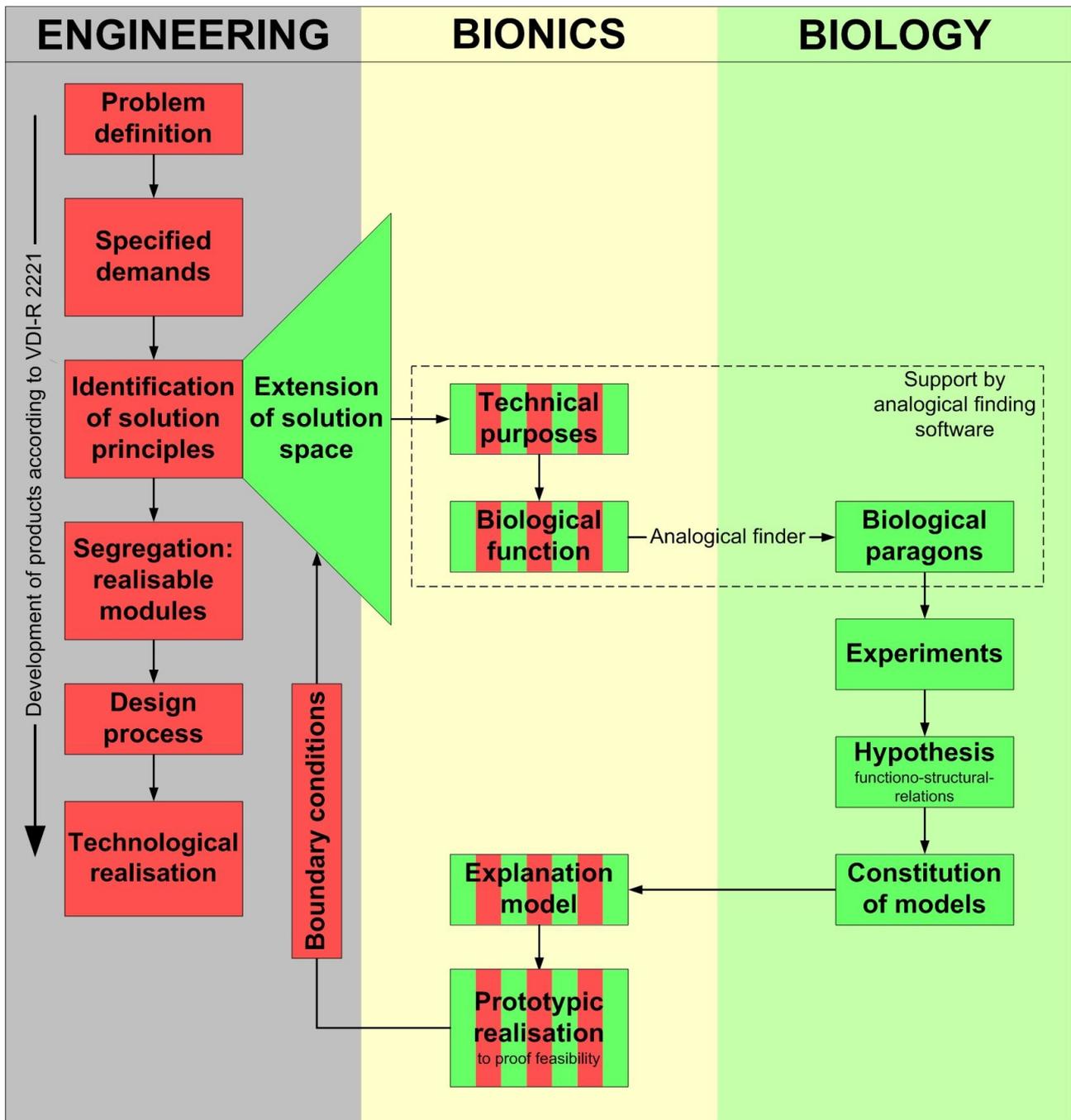


Bild 5.6: Bionic Algorithm nach SCHILLING ET AL. [SFM+05]

Wie bereits erwähnt wurde, greifen SCHILLING ET AL. in ihrem Modell bestehende Konzepte anderer Autoren auf. Vor allem der Verweis auf die VDI-Richtlinie 2221 (VDI2221) stellt ein Alleinstellungsmerkmal ihres Ansatzes dar. Durch die Einbeziehung der Darstellung des Ablaufes einer Produktentwicklung in ihr Modell wird deutlich, wie Bionik, Technische Biologie und „klassische“ Produktentwicklung zusammenspielen. Ihr Modell beschreibt dabei nicht nur die Aufeinanderfolge der notwendigen Aufgaben, sie stellt auch die Abhängigkeiten der einzelnen Schritte untereinander dar.

### 5.1.6 Zusammenfassung und Kritik

Bei den vorgestellten Modellen handelt es sich im Wesentlichen um Orientierungsmodelle. Zwar erwecken die dargestellten Diagramme den Eindruck, bei der Lösungssuche mittels Bionik handele es sich um einen klar definierbaren Ablauf, der, wenn er strikt befolgt wird, zu einem erfolgreichen Lösungstransfer führt, doch weisen die Autoren zum Teil selbst darauf hin, dass sich der Prozess nur schwer in seiner gesamten Komplexität erfassen und darstellen lässt. Die oben diskutierten Vorgehensweisen sind daher nicht als konkreter Handlungsablauf sondern eher als eine Richtschnur für das bionische Arbeiten zu verstehen.

Die genannten Autoren stimmen im Wesentlichen darin überein, dass der gesamte Prozess in *Aufbereiten, Suche, Analyse* und *Transfer* gegliedert werden kann. Die Aufbereitung der technischen Lösungen ist dabei Teil der Technischen Biologie und sollte zweckmäßiger Weise unter Federführung der Biologen erfolgen. Suche, Analyse und Transfer hingegen sind Aufgaben, die dem Ingenieur zukommen. Folgt man dieser Betrachtung, so ist es auch einsehbar, dass die biologischen Systeme natürlich in einer Weise aufbereitet werden müssen, die eine spätere Suche nach technischen Gesichtspunkten ermöglicht. Der Biologe wird hier auf die Mitarbeit des Ingenieurs angewiesen sein. Auf der anderen Seite ist es für den Ingenieur sinnvoll, sich bei der Analyse einer gefundenen (biologischen) Lösung von einem Biologen beraten zu lassen. Der Prozess setzt eine enge Kooperation und Kommunikation von Fachleuten verschiedener Fachbereiche voraus. Dieser Aspekt des bionischen Arbeitens wird von den Autoren zwar eingehend gewürdigt; er kommt jedoch in den genannten Modellen nicht zum Ausdruck.

Im Schrifttum der Bionik wird häufig vorgeschlagen, dass der Zugang zum biologischen Wissenspool über definierte Funktionen erfolgen sollte [Hil01; Rum04; SFM+05]. Dies ist verständlich, soll ein technisches System doch in erster Linie eine Funktion erfüllen. Die Vergleichbarkeit von weiteren Aspekten, wie die verwendeten Materialien, Strukturen und Herstellbarkeit, wird in einer nachgelagerten Analyse überprüft. Eine solche funktionsgetriebene Suche muss jedoch nicht zwangsläufig der einzige (und richtige) Weg sein, „*denn in den Organismen sind Materialien nicht dazu da, um Funktionen zu erfüllen. Vielmehr entstehen im Versuchs-Irrtums-Prozess Dinge, die dann auch eine Funktion haben, ohne dass diese zuvor festgelegt wurde*“ [Dra02, S. 137]. In der Natur werden Funktionen nicht wie im Produktentwicklungsprozess antizipiert. Sie entstehen während des Prozesses der Funktionserfüllung, indem sich bestehende Strukturen aufgrund äußerer Reizeinflüsse differenzieren. Des Weiteren werden in Natur und Technik z. T. unterschiedliche Strategien zur Lösung einer Problemstellung verfolgt. Wo Produktentwickler nach einer konkreten Lösung für eine Problemstellung sucht, wird sie vielleicht in der Natur umgangen. Vor diesem Hintergrund verwundert

es nicht, dass typisch technische Funktionen in Natur nicht gefunden werden können und dass sich dort andere dem Ingenieur zum Teil fremd erscheinende Funktionen und Strukturen etabliert haben.

KESEL weist darauf hin, dass in der Natur Funktion, Struktur und Materialien in einer engen Beziehung zueinander stehen [Kes01, S. 164]. Für den Bereich der Technik gilt ähnliches. So sind sowohl in der Technik als auch in der Biosphäre Funktionen an Strukturen gebunden. Strukturen wiederum haben einen Entstehungsprozess hinter sich. Dass sich Technik und Natur in diesen Punkten gravierend unterscheiden, ist allgemein bekannt. Vor diesem Hintergrund scheint es wenig sinnvoll, beim bionischen Arbeiten zunächst nur einen einzelnen Aspekt (die Funktion) der Lösung zu betrachten, und dann in einem weiteren Schritt zu prüfen, ob die gefundene Lösung auch technisch realisierbar ist. Eine solche Vorgehensweise endet zwangsläufig in einem „Mapping-Problem“, das sich auch durch die Wahl eines anderen Abstraktionsgrades, wie von GRAMANN [Gra04] vorgeschlagen, nur bedingt lösen lässt.

Darüber hinaus existieren zur Unterstützung einer funktionsorientierten Suche kaum Werkzeuge und Hilfsmittel. Die wenigen bekannten – wie der bereits erwähnte Katalog biologischer Systeme von HILL [Hil01] – sind relativ schwer verfügbar und finden daher in der industriellen Praxis kaum Anwendung. Zudem müssen Katalogsysteme mit der Zunahme des Wissens über biologische Systeme kontinuierlich wachsen. Ihre Wartung ist überaus aufwändig und von einer einzelnen Person oder Organisation kaum zu leisten. Auch aus dieser Sicht scheint ein auf „Funktionen basierendes Suchsystem“ alles andere als optimal.

Zweifelsfrei können in der Natur unkonventionelle, für die Technik nutzbare Lösungen gefunden werden; sie zu identifizieren ist jedoch nicht trivial. Die Suche nach gemeinsamen Randbedingungen, wie von GRAMANN vorgeschlagen, scheint ein gangbarer Weg, läuft man doch hier nicht Gefahr einer Lösungsfixierung in Form einer „Funktionsfixierung“. Wer in der Natur nach Lösungen für eine technische Problemstellung Ausschau hält, muss in erster Linie offen für andere Herangehensweisen, alternative Funktionen und Strukturen sein. Die „einseitige“ Suche nach zuvor festgelegten Funktionen ist zwar generell möglich und mag in bestimmten Fällen zum Erfolg führen, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die „restlichen“ Aspekte einer gefundenen Lösung nicht kompatibel zur technischen Problemstellung sind und eine Realisierung deshalb scheitert.

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der die Lösungssuche mittels Bionik nicht allein auf die Funktionssicht beschränkt, sondern versucht, ein ganzheitliches Analogiebild aufzubauen. Das oben angesprochene Mapping-Problem soll so überwunden werden. Zusätzlich wird die fachübergreifende Kommunikation zwischen Experten als zentrales Element der interdisziplinären Lösungssuche thematisiert.

## 5.2 Bionisches Analogiemodell

Der Aufbau eines ganzheitlichen Analogiemodells, das über eine reine Funktionssicht hinausgeht, setzt voraus, dass der Produktentwickler bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses in der Lage ist, neben den Funktionen auch andere Aspekte der Lösung wie Materialien und Herstellungsverfahren zu beschreiben. Bevor das Analogiemodell dargestellt wird, soll daher im Folgenden gezeigt werden, dass diese Voraussetzung gegeben ist.

### 5.2.1 Vorbetrachtungen

Wie oben dargestellt wurde, ist die Bionik in der Produktentwicklung in den Prozess der Lösungsfindung einzuordnen. Bionik kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn es für eine technische Problemstellung noch keine Lösungsansätze gibt oder wenn Ansätze gefunden werden sollen, die sich von den bisherigen Konzepten grundlegend unterscheiden. Eine Anwendung der Bionik in der Lösungsfindung ist daher bei Neukonstruktionen aber auch bei Anpassungskonstruktionen mit relativen umfassenden Änderungen gegenüber der Ausgangslösung denkbar (vgl. Kapitel 3.3).

Zweckmäßigerweise sollte vor Beginn einer Suche nach Lösungsprinzipien die Aufgabenstellung lösungsneutral beschrieben sein. Die Konstruktionsmethodik im deutschsprachigen Raum propagiert hierzu die Verwendung von Funktionsstrukturen<sup>5</sup>. Die Beschreibung der Lösung auf einem relativ hohen Abstraktionsgrad soll den Produktentwickler darin unterstützen, das Problem umfassend zu betrachten und in allen Richtungen nach möglichen Lösungen zu suchen. Die Lösungssuche wird so objektiviert und einer vorzeitigen Lösungsfixierung vorgebeugt.

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass der Produktentwickler bereits während Konfrontation mit der Aufgabenstellung bestimmte Vorstellungen von der Lösung hat [PB93, S. 78]. Wenn er z. B. mit der Entwicklung eines *neuen* Automobils beauftragt wird, wird er – vereinfacht dargestellt – mit der Lösung etwas verbinden, das auf vier Rändern fährt, einen (Verbrennungs-)Motor und ein Getriebe hat. Er wird die Aufgabenstellung nicht soweit abstrahieren und nach einem *selbstfahrenden Transportmittel für Personen* suchen; es sei denn, dies wird explizit vom ihm verlangt. Durch die Wahl eines höheren Abstraktionsgrads eröffnen sich zwar andere und neue Lösungsmöglichkeiten, doch spätestens, wenn alle Restriktionen<sup>6</sup> berücksichtigt sind, wird das Automobil wieder vier Räder besitzen. Es stellt sich daher die Frage, inwiefern einem erfahrenden Produktentwickler mit dem Abstrahieren der Aufgabenstellung, dem Aufstellen einer Funktionsstruktur etc. geholfen ist, zeigen sie ihm doch letzt-

---

5 Funktionsstrukturen beschränkten sich zumeist auf die Darstellung der technische Funktionen. Andere Aspekte wie ergonomische, ökonomische oder ökologische Funktionen eines Produktes werden (wenn überhaupt) in anderer Form berücksichtigt.

6 Hierzu zählen z. B. Fragestellungen wie: Was wird vom Markt akzeptiert? Was kann das Unternehmen umsetzen? Welcher Aufwand ist mit der Realisierung verbunden?

lich zumeist Lösungen auf, die dann doch nicht realisiert werden können. Zudem scheint ein gewisser Grad an Vorfixierung der Lösungsfindung förderlich, trägt sie doch zur Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses bei.

Ziel der obigen – zugegebenermaßen sehr überspitzt dargestellten – Ausführungen war es weniger, Kritik an bestehender Lehrmeinung zu üben<sup>7</sup>, vielmehr sollte verdeutlicht werden, dass der Produktentwickler bereits sehr früh im Entwicklungsprozess in der Lage ist, die Lösung nicht nur unter funktionalen Aspekten, sondern auch strukturell zu beschreiben. Wie diese Strukturen im Detail gestaltet sind, ist dabei zunächst nicht relevant, denn sie werden zu einem späteren Zeitpunkt konkretisiert. Dass sich diese Strukturen im Verlauf des Prozesses wandeln können (und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch werden), ist dabei unbestritten.

Ein Blick auf die Herangehensweise, die seitens des Industriedesigns [Woh05] praktiziert wird, unterstützt die obige Argumentation. Der Gestaltungsprozess stützt sich hier von Anfang an auf visuelle Darstellungen des Produktes. Die Recherche am Beginn der Gestaltungsprozesses dient nicht allein der Beschaffung von Informationen, sondern auch dem Gewinnen von Inspirationen. Ihre Verarbeitung erfolgt dann durch eine zuallererst spielerisch erscheinende Variation der Möglichkeiten, die im Verlauf der Entwicklung immer weiter konkretisiert werden, bis sie letztlich in die finale Lösung münden.

Im Industriedesign erfolgt die Gestaltung zunächst weitestgehend unabhängig von Fragestellungen, wie z. B. eine bestimmte Funktion im Detail realisiert werden kann oder welche Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. Das Ziel der Designtätigkeit besteht nach WOHLGEMUTH in der Mensch-Technik-Optimierung bei gleichzeitiger Betrachtung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses [Woh05, S. 273 ff.]. Er sieht daher die *Mensch-Produkt-Integration* und die *Produkt-Umwelt-Integration* als zwei Betrachtungsrichtungen, die für das Industriedesign zunehmend an Bedeutung gewinnen. Der Designprozess stellt insofern eine ganzheitliche Optimierungsaufgabe dar, die nur durch eine iterative Vorgehensweise gelöst werden kann.

Bildliche Darstellung, wie sie im Industriedesign sehr früh genutzt werden, können, wie DÖRNER zeigt, spätere Änderungen der Struktur erschweren und den Produktentwicklungsprozess negativ beeinflussen [Dör95, S. 297 ff.]. Es erscheint jedoch falsch, aus diesem Grund am Beginn einer Lösungsfindung gänzlich auf visuelle Darstellungen der Lösung zu verzichten oder die Beschreibung möglicher Strukturen zugunsten einer lösungsneutralen Darstellung zurückzustellen. Diese „Initial-Strukturen“ sind wichtige „Lösungskeime“.

---

<sup>7</sup> Die Konstruktionsmethodik stellt eine Fülle von Werkzeugen bereit, die – an richtiger Stelle und mit Bedacht eingesetzt – den Produktentwicklungsprozess sehr gut unterstützen können.

Ähnliches gilt auch für andere Aspekte der entstehenden Lösung. So hat der Produktentwickler mit einer möglichen Struktur – zumindest in Ansätzen – auch Materialien und Fertigungsverfahren im Kopf. Diese „Vorauswahl“, die im weiteren Entwicklungsprozess noch verifiziert und ergänzt werden muss, steht dem Produktentwickler bereits während der Lösungsfindung zur Verfügung und kann daher zur Analogiebildung herangezogen werden.

### 5.2.2 Analogiebildung als Mapping-Prozess

Wie oben bereits ausgeführt wurde, wird in den Übertragungsmodellen der Bionik die funktionsorientierte Suche als geeignetes Mittel für den Lösungstransfer betrachtet. Das Analogiemodell, das hier vorgestellt wird, verfolgt einen allgemeineren Ansatz. Es erweitert die bislang sehr „funktionslastige Sichtweise“ um weitere Aspekte mit dem Ziel, ein ganzheitliches Analogiebild zu schaffen. Durch das Gegenüberstellen (*mapping*) soll der Produktentwickler in die Lage versetzt werden, Gemeinsamkeiten und Gegensätze der beteiligten Analoga zu erkennen und sich der Grenzen der Analogie bewusst zu werden. Er kann dadurch zweckmäßige Analogien finden und mögliche Lösungsansätze ermitteln.

Den Ausgangspunkt für die Bildung von Analogien stellen Assoziationen dar. Meist ist es die zufällige Konfrontation mit einem äußeren Reiz, die eine Assoziation hervorruft. Für einen Produktentwickler kann bereits die Beschäftigung mit der Aufgabenstellung Auslöser für eine Analogie sein. Oft ist es die Frage, wo ähnliche Probleme auftreten, die den Pfad für eine Analogiebildung bereitet. Doch auch bestehende Lösungen oder Ansätze, die während des Produktentwicklungsprozesses generiert werden, können solche Reize auslösen. Die Bildung von Assoziationen lässt sich auch – wo sie nicht von selbst ins Bewusstsein treten – durch bestimmte Methoden anregen. Beispiele für solche Methoden sind das Brainstorming, die Synektik oder die Reizwort-Methode.

Das bionische Analogiemodell nutzt die Tatsache, dass sowohl technische wie auch biologische Systeme unter gewissen Aspekten betrachtet und durch diese auch beschrieben werden können. Im Bild 5.7 sind einige dieser Aspekte zusammengestellt. Je nach Problemstellung treten dabei bestimmte Facetten in den Vordergrund, während andere in den Hintergrund gerückt werden. Um dies zu verdeutlichen, wurden im Bild 5.7 die einzelnen Begriffe unterschiedlich stark hervorgehoben.

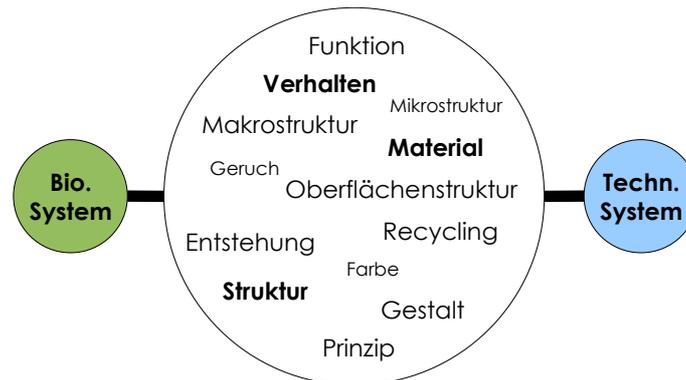


Bild 5.7: Mögliche Aspekte einer analogen Gegenüberstellung

Zum Aufbau des Analogiemodells ist es zunächst notwendig, alle Aspekte, die mit der Problemstellung im Zusammenhang stehen, zu identifizieren. Dabei ist es zweckmäßig, das biologische und das technische System getrennt zu untersuchen und die Aspekte ungeachtet ihrer Relevanz für die Analogie zusammenzutragen (Bild 5.8). Aspekte, die für ein System relevant sind, sollten auch auf der Seite des jeweils anderen Systems entsprechend ergänzt und auf ihre Relevanz hin untersucht werden. Ziel ist es, eine Zusammenstellung aller Aspekte zu finden, die sowohl für das biologische als auch für das technische System relevant sind. Das Auffinden möglicher Facetten der Analogie kann durch Fragen in der Form *Was ist typisch für das betrachtete System? Was wird mit ihm assoziiert?* unterstützt werden. Durch die Vielzahl der Aspekte, die dabei gefunden werden, wird eine Gegenüberstellung „auf breiter Front“ möglich und die Voraussetzung geschaffen, ein ganzheitliches Analogiebild aufzubauen.

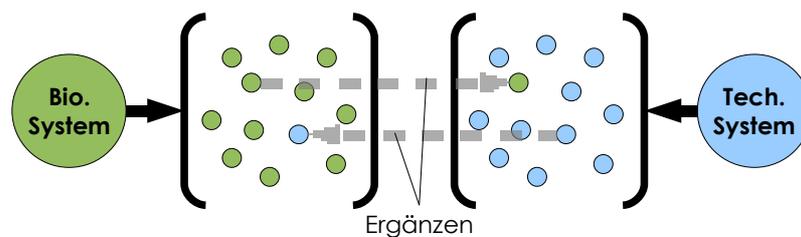


Bild 5.8: Zusammentragen der Aspekte

Neben den Aspekten selbst müssen auch die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen ihnen beim Aufbau des Analogiebildes berücksichtigt werden. Die Kenntnisse über den gegenseitigen Einfluss der Aspekte werden dann relevant, wenn ein Ansatz, der einem biologischen System entnommen wurde, auf eine technische Lösung übertragen werden soll. Sind dem Produktentwickler die Wechselwirkungen bewusst, kann er besser abschätzen, wann er mit der Übernahme des biologischen Lösungsansatzes „ein altes Problem durch zwei Neue ersetzt“.

Da die Zusammenhänge und die Wechselwirkungen zwischen den gesammelten Aspekten sich im biologischen und im technischen System unterscheiden, sollten sie ebenfalls unabhängig voneinander ermittelt werden (Bild 5.9). Betrachtet man beispielsweise den Zusammenhang zwischen Material

und Recycling, stellt man fest, dass biologische Strukturen nach einer gewissen Zeit von selbst zerfallen und ihre Baumaterialien dem Stoffkreislauf wieder zur Verfügung stellen. Technische Produkte hingegen müssen in der Regel „aktiv“ recycelt werden, ein selbstständiges Zurückfließen der Materialien stellt hier die Ausnahme dar. Im biologischen System hängen die Aspekte Material und Recycling deutlich enger zusammen, als dies beim technischen System der Fall ist.

Die Zusammenhänge und die Wechselwirkungen zwischen den Aspekten haben folglich im biologischen und im technischen System unterschiedliche Wertigkeiten. Im Bild 5.9 wird dies durch die unterschiedlich starken Verbindungslinien zum Ausdruck gebracht. Die entstehenden Beziehungsnetzwerke charakterisieren die als analog gegenübergestellten Systeme. Sie zeigen dem Produktentwickler auf, welche Aspekte sich in welcher Weise gegenseitig beeinflussen und welche daher im Fall einer „Lösungsübertragung“ berücksichtigt werden müssen.

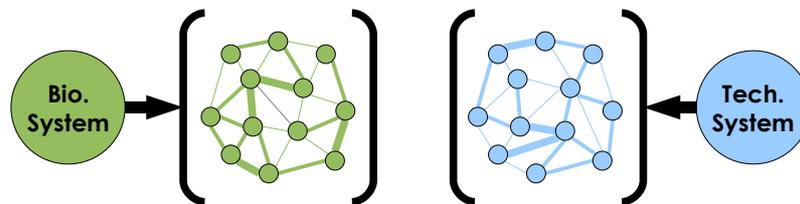


Bild 5.9: Aufbauen der Beziehungsnetzwerke

Nachdem die Aspekte und die Beziehungsnetzwerke der beteiligten Analoga zusammengestellt wurden, wird in einem dritten Schritt das Analogiemodell erstellt. Es handelt sich hierbei um einen iterativen Prozess, bei dem der Produktentwickler sich zunächst von den gefundenen einen beliebigen Aspekt wählt und im Hinblick auf die technische Problemstellung untersucht. Den Wechselwirkungen folgend hangelt er sich durch das Netzwerk der betrachteten Facetten (Bild 5.10). Durch Fragestellungen wie *Welche Rolle spielt der betrachtete Aspekt im biologischen und welche im technischen System?* oder *Welche Zusammenhänge und Wechselwirkungen sind für die technische Problemstellung relevant, welche können außer Acht gelassen werden?* kann der Produktentwickler die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede der analogen Gegenüberstellung herausarbeiten. Ziel dieser Vorgehensweise ist es nicht nur, den Gesamtzusammenhang zu beleuchten und Lösungsansätze für bestehende Probleme aufzudecken, sondern auch die Lösungskonzepte und Verfahrensweisen auf Seiten der Technik kritisch zu hinterfragen. Aus der Kenntnis des Gesamtzusammenhanges heraus kann er das biologische System als Ideengeber nutzen und Anregungen finden, die über die ursprüngliche Intention der Analogie hinausgehen. Die vorgestellte Verfahrensweise hilft dem Produktentwickler so, unabhängig von einer konkreten Problemstellung alternative Lösungsansätze generieren und seinen Lösungsraum zu erweitern (vgl. Kapitel 4.3.3).

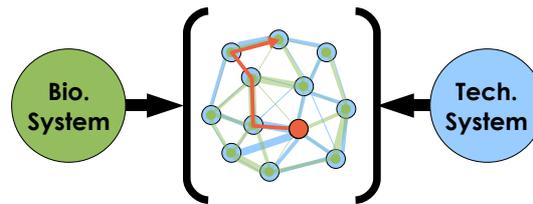


Bild 5.10: Zusammenführen der relevanten Aspekte

Der oben beschriebene Prozess erfolgt mit dem Ziel, das biologische und das technische System ganzheitlich zu vergleichen. Die Zweckmäßigkeit der Analogie sollte dabei jedoch nicht aus den Augen verloren werden. So macht es für einen Designer, der sich in Bezug auf die Anmutung seines Produktes von den Lösungen der Natur inspirieren lassen möchte, Sinn, einen vergleichenden Blick auf die Materialien und Strukturen zu werfen. Erkenntnisse, wie diese Materialien und Strukturen in der Natur entstehen sind, sind für ihn jedoch weniger von Interesse. Auf der anderen Seite kann diese Kenntnis vom Entstehungsprozess biologischer Strukturen einem Produktentwickler, der nach Lösungen zur Erzeugung von Strukturen im Nano-Bereich sucht, entscheidende Impulse liefern. Welche Aspekte beim Aufbau des Analogiemodells eine Rolle spielen, hängt demnach stark von der jeweiligen Problemstellung ab. Gleiches gilt für den Weg durch das Beziehungsnetzwerk. Auch hier sind detaillierte Angaben darüber, welcher Weg beim Aufbau des Analogiemodells verfolgt werden sollte, nur schwer möglich. Es ist daher die Aufgabe des Produktentwicklers unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen, das rechte Maß zu finden. Dabei hat er den Zeitrahmen ebenso mit einzukalkulieren, wie die Art und den Umfang der verfügbaren Informationen.

Die genannten Beispiele zeigen, dass sich das vorgestellte Analogiemodell flexibel für verschiedene Problemstellungen anwenden lässt. Der Detaillierungsgrad, mit dem die einzelnen Facetten der Analogie zusammengetragen werden und mit dem die Beziehungsnetzwerke aufgebaut werden, kann durch den Anwender entsprechend der Aufgabenstellung frei gewählt werden. Durch die Flexibilität und die Skalierbarkeit des Modells ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum im Rahmen des bionischen Arbeitens. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zum Aufbau des Analogiemodells anhand eines Beispiels beschrieben.

### 5.2.3 Verallgemeinerung des Analogiemodells

Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Analogiemodell und die damit verbundene Herangehensweise ist nicht auf Analogien zwischen Biologie und Technik beschränkt. Wie bereits dargelegt wurde, können prinzipiell Assoziationen aus beliebigen Bereichen, den Ausgangspunkt für eine Analogie bilden. Die beschriebene Vorgehensweise ist unabhängig vom Inhalt der beteiligten Analogie und lässt sich daher auch auf Analogien aus anderen Bereichen übertragen.

Für den Produktentwickler sind Technik-Technik-Analogien besonders interessant, liegen die beteiligten Analoga doch (zumindest annähert) in der gleichen fachlichen Domäne. Es ist daher zu vermuten, dass ein analoger Vergleich hier einen höheren Grad an Übereinstimmung und eine bessere Kompatibilität zwischen dem Fachgebiet, dem die Problemstellung entstammt, und dem Gebiet, in dem nach einem Lösungsansatz gesucht wird, aufweist, als dies bei anderen, nichttechnischen Analogien der Fall ist.

Im Folgenden soll die Anwendung des Analogiemodells anhand einer nicht biologisch inspirierten Analogie gezeigt werden. Dazu wird das bereits in Kapitel 4.1.2 vorgestellte studentische Entwicklungsprojekt „Carving-Hilfe“ noch einmal aufgegriffen. Zur Erinnerung: In diesem Projekt ging es darum, die Skistöcke temporär auf dem Ski zu befestigen, um das Aufkanten der Ski beim Carven zu unterstützen. Es sei darauf verwiesen, dass der hier skizzierte Ablauf keine Schilderung des realen Entwicklungsprozesses ist, sondern ihn in fiktiver Form beschreibt. Wie später noch darzustellen sein wird, gestaltet sich die Erfassung von Denkprozessen, die einer Bildung von Assoziationen und Analogien vorausgehen, z. T. recht schwierig (vgl. Kapitel 5.2.4). Für die Darstellung des Analogiemodells ist eine vereinfachte Beschreibung ausreichend. Aus diesem Grund ist das gewählte Beispiel hypothetisch. Es soll verdeutlichen, wie ein Analogiebildungsprozess in der Produktentwicklung ablaufen *könnte*.

Den Studenten standen während des Projektes Ski und Stöcke zur Verfügung. Während die Studenten sich mit den „Utensilien“ vertraut machten, wurden Assoziationen geäußert. Unter anderem standen die Begriffe „Krückstock“ und „Kugelschreiber“ im Raum. Dass der Skistock hier mit einem Kugelschreiber assoziiert wurde, lässt sich mit der stiftförmigen Gestalt der Skistockspitze begründen. Diese erste auf einer Strukturähnlichkeit basierenden Assoziation bildet den Ausgangspunkt für die Analogie.

Im Sinne des vorgestellten Analogiemodells werden zunächst unabhängig voneinander die Aspekte zusammenzutragen, die typisch für Skistock sind und solche, die einem Kugelschreiber in Verbindung gebracht werden (Schritt 1: Zusammentragen der Aspekte). So dient ein Stift zum Schreiben auf Papier, seine Mine lässt sich womöglich auf Knopfdruck bewegen. Der Skistock hingegen kommt bei Eis und Schnee zum Einsatz; Witterungsbedingungen, die für einen Kugelschreiber eher untypisch sind. Die Spitze eines Skistocks besteht aus Metall. Ein Kugelschreiber hingegen ist zu einem großen Teil aus Kunststoff gefertigt. Er besitzt zudem – verglichen mit dem Skistock – ein „komplexes Innenleben“. Relevant ist ebenfalls, dass sowohl Kugelschreiber und als auch Skistöcke mit den Händen gegriffen werden und dass dies auf sehr unterschiedliche Art und Weise erfolgt. Mit diesen Überlegungen tauchen die Studenten bereits in den zweiten Schritt des Prozesses ein (Aufbauen der Beziehungsnetzwerke).

Wie bereits erwähnt, wird beim klassischen Carven der Skistock nicht genutzt. Fragen die Studenten nach Möglichkeiten zur Aufbewahrung momentan nicht genutzter Stifte, stellen sie vielleicht fest, dass diese bei den meisten von ihnen unsortiert in einem Schubkasten liegen (Schritt 3: Zusammenführen der relevanten Aspekte). Ein Kommilitone hat möglicherweise die Angewohnheit, sich einen Stift hinter das Ohr zu klemmen. Ein anderer erinnert sich, auf dem Bürotisch eines Professors einen schön gearbeiteten Messingblock gesehen zu haben, in dem ein Füllfederhalter steckt. Dieses Steckprinzip, so stellen die Studenten fest, ließe sich auch mit der ähnlich gestalteten Spitze eines Skistocks realisieren. Dennoch existieren einige entscheidende Unterschiede: So ist die Hand des Professors, wenn sie den Füllfederhalter aus dem Messingblock nimmt, wesentlich näher am „Ort des Geschehens“ als die Hand des Skifahrers. Zudem kann erwartet werden, dass der Skifahrer sich vor der Kälte mit Handschuhen schützt, die ihn in seinen Bewegungsfreiheit einschränken und den „Einfädelvorgang“ behindern. Ein Sachverhalt, der in jedem Fall näher geprüft werden sollte.

An dieser Stelle soll die Darstellung des fiktiven Projekttreffens enden. Im Beispiel wurde deutlich, dass die beschriebenen Vorgehensweise zur Analogiebildung Impulse für Lösungsfindung liefern kann. Durch die Analogie zum Kugelschreiber erhielten die Studenten nicht nur Anregungen für die Lösungsfindung. Die methodische Vorgehensweise zur Bildung eines ganzheitlichen Analogiebildes zwang die Studenten dazu, sich intensiv mit der Problemstellung zu beschäftigen. Dabei wurden auch ungewöhnliche Aspekte, die die erst durch die Analogie zum Kugelschreiber mit in die Diskussion hinein getragen wurden, berücksichtigt. Die Einbeziehung der Analogie und ihre systematische Analyse hilft dem Produktentwickler so, die Aufgabenstellung ganzheitlich zu betrachten. Sie zeigt ihm Aspekte der Problemstellung auf, die ohne das Einbeziehen der Analogie möglicherweise vernachlässigt worden wären.

### **5.2.4 Diskussion des Analogiemodells**

Mit der im Kapitel 5.2.2 vorgestellten Vorgehensweise hat der Produktentwickler die Möglichkeit, das Analogiemodell je nach Bedarf sowohl in der Breite wie auch in der Tiefe auszubauen und Prozess zu einem Zeitpunkt seiner Wahl abubrechen. Das Modell ist flexibel und skalierbar. Ein einfacher Analogievergleich zur Veranschaulichung eines Sachverhaltes kann durch das Modell genauso beschrieben werden wie die Vorgehensweise, die notwendig ist, um Erkenntnisse in einem neuen Forschungsfeld zu gewinnen.

Das Analogiemodell basiert auf Beobachtungen von Teamsitzungen verschiedener Entwicklungsprojekte. Die hier gewonnenen Erkenntnisse wurden zum Teil durch eine gezielte Befragung der Probanden ergänzt, in der diese gebeten wurden, ihre Gedanken, die zur Bildung der Analogie beigetragen haben, nachzuvollziehen. Diese recht pragmatisch anmutende Vorgehensweise hat Mängel. So

ist bekannt, dass durch Selbstbeobachtung gewonnene Erkenntnisse subjektiv und nicht nachprüfbar sind [May79, S. 13]. Hinzu kommt, dass sich die Probanden ihrer genauen Gedanken oft nur schlecht entsinnen konnten.

Assoziationen laufen in der Regel unbewusst ab. Sie sind damit einer objektiven Beobachtung nur schlecht zugänglich. Zwar existieren Ansätze, bei denen Probanden gebeten werden, während eines Entwicklungsprozesses laut zu denken, ihre Äußerungen auf Tonband aufzunehmen, um sie später analysieren zu können [Dor97, S. 99 ff.], doch kann diese für den Probanden ungewohnte Vorgehensweise die Gedanken und den Entwicklungsprozess beeinflussen und die Ergebnisse verfälschen. Darüber hinaus lässt sich diese für Einzelpersonen konzipierte Methode nicht auf Entwicklungsprojekte übertragen, die in einer Gruppe stattfinden. Hier lässt sich die Diskussion zwar selbst mit-schneiden, doch einem Diskussionsbeitrag geht in der Regel ein Denkprozess voraus. Würden auch diese Gedanken von allen Teammitgliedern laut geäußert werden, wäre eine Diskussion unmöglich.

Die oben dargestellte Vorgehensweise zur Untersuchung der Entstehung von Assoziationen und der Rolle von Analogien wurde aus zwei Gründen gewählt: Zum einen ist sie relativ einfach umzusetzen und zum anderen kann ihr Einfluss auf den Verlauf des Produktentwicklungsprozess vernachlässigt werden<sup>8</sup>. Es ist jedoch anzumerken, dass während der Untersuchung keine Laborbedingungen herrschten, wie sie aus psychologischen Forschung bekannt sind. Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu genießen.

Das Analogiemodell weist in gewisser Hinsicht Ähnlichkeiten zum Ansatz von SCHÖN [Dor97, S. 74] auf, der mit seinem Modell die Vorgehensweise im Produktentwicklungsprozess darzustellen versucht (Bild 5.11). Diese Ähnlichkeit kann als ein Indiz dafür gelten, dass die im Analogiemodell beschriebene Vorgehensweise kompatibel zur „natürlichen“ Vorgehensweise des Produktentwicklers ist.

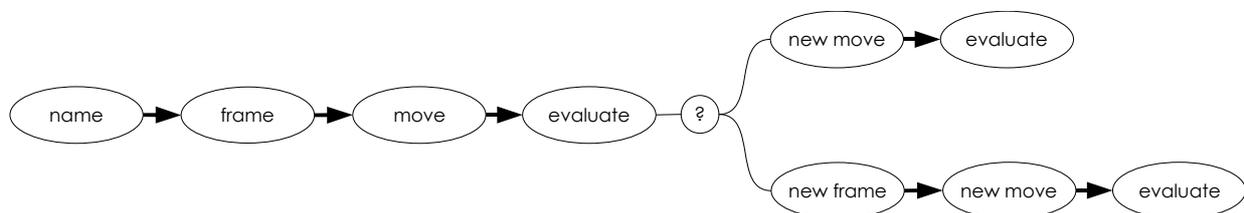


Bild 5.11: Basic cycle of reflective practise [Dor97, S. 74]

SCHÖN benennt in seinem „cycle of reflective practise“ die Schritte „naming“, „framing“, „making moves“ und „evaluating“ [Dor97, S. 74 f.]. Während des *naming* werden die Objekte, die im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden sollen, identifiziert und selektiert. Im Analogiemodell entspricht dieser Schritt dem *Zusammentragen der Aspekte*. Unter dem *framing* wird das Einordnen

<sup>8</sup> Den Studenten war nicht bewusst, dass sie während der Teamsitzung „unter Beobachtung standen“.

der Objekte in den Gesamtkontext sowie die Darstellung ihrer Beziehungen untereinander verstanden. Dieser Schritt ist im Analogiemodell im *Aufbauen der Beziehungsnetzwerke* wiederzufinden. *Making moves* meint eine „*experimental action [...] of the design task*“ [Dor97, S. 74] im Sinne einer Simulation, deren Ergebnis der Produktentwickler im Anschluss bewertet (*evaluating*). Ein solches Vorausdenken und Bewerten erfolgt auch im Analogiemodell, denn der Produktentwickler wird im Schritt „*Zusammenführen der relevanten Aspekte*“ dazu angehalten, sich der Konsequenzen der Analogie bewusst zu machen. Zusätzlich erfolgt im Analogiemodell ein Mapping-Prozess, der in dieser Form im *cycle of reflective practise* nicht zu finden ist.

### 5.3 Analogiebildung als Kommunikationsprozess

Im Kapitel 4.4 wurde postuliert, dass die Entstehung von Innovationen zukünftig verstärkt von der Einbindung fachfremder Experten in den Produktentwicklungsprozess abhängen wird und dass die fachübergreifende Kommunikation in diesem Zusammenhang an Bedeutung gewinnt (These 3, S. 76). Bevor im Folgenden ein Modell zur Beschreibung der Kommunikation von Produktentwicklern und Experten vorgestellt wird, sollen zunächst einige Aspekte der Kommunikation und des Wissenstransfers betrachtet werden.

#### 5.3.1 Vorbetrachtungen

Kommunikation ist eine der komplexesten und wichtigsten Fähigkeiten des Menschen [Sta06]. Sie umfasst mehr als die Weitergabe sachbezogener Informationen. Neben der Betonung und der Sprachmelodie spielen Gesten, Körperhaltung und Mimik eine entscheidende Rolle. Diese als nonverbale Kommunikation bekannte Form des Informationsaustausches stellt vermutlich die älteste Form zwischenmenschlicher Verständigung dar. Sie soll jedoch an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden, da sie in Bezug auf den hier thematisierten fachübergreifenden Wissenstransfer keine dominierende Rolle spielt.

Für die menschliche Kommunikation existiert bis heute trotz zahlreicher Ansätze und Modelle keine einheitliche Theorie [Sta06]. Im Schrifttum der Psychologie wird häufig das Kommunikationsmodell von SHANNON & WEAVER [WS49] zitiert. Dabei handelt es sich um ein lineares Modell, das aus den Elementen *Informationsquelle*, *Verschlüsselung*, *Nachricht*, *Kanal*, *Entschlüsselung*, *Empfänger* und einer *Störquelle* besteht (Bild 5.12). Das Modell ist rein technisch orientiert, denn das ursprüngliche Ziel bestand darin, ein Modell für die optimale Kommunikation an die amerikanische Armee zu liefern [Sta06].

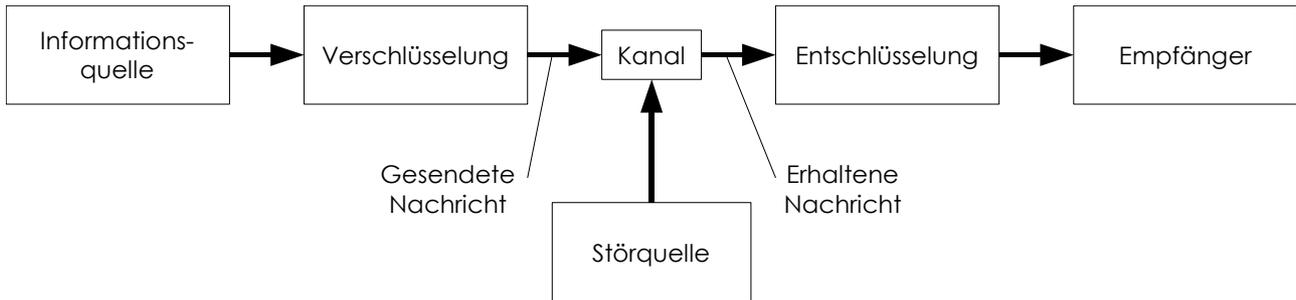


Bild 5.12: Kommunikationsmodell nach SHANNON & WEAVER [WS49, S. 34]

Ein weiteres bekanntes Modell ist das von SCHULZ VON THUN [Sch01]. Sein Kommunikationsmodell besteht aus vier Seiten, die die verschiedenen Botschaften einer Nachricht symbolisieren. Nach SCHULZ VON THUN sind mit einer Nachricht neben der *Sachinformation* immer auch ein *Appell*, eine *Beziehungsdefinition* und eine *Selbstoffenbarung* (Bild 5.13) verbunden.

Will der Sender dem Empfänger etwas mitteilen, so muss er sein Anliegen in Form erkennbarer Zeichen verschlüsseln. Durch die Entschlüsselung der Nachricht beim Empfänger kann diese „verfälscht“ werden und unter Umständen zu Missverständnissen führen. Häufig ist es daher so, dass der Empfänger dem Sender zurückmeldet, wie die Nachricht bei ihm angekommen ist. Durch dieses Feedback lässt sich prüfen, ob die Absicht des Senders mit dem Empfangsresultat übereinstimmt.

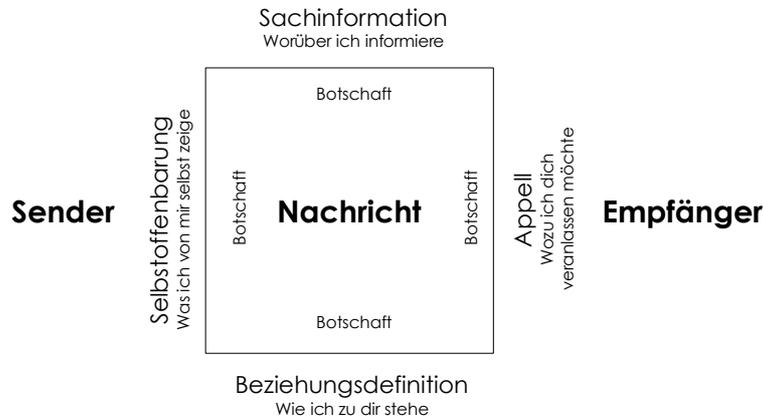


Bild 5.13: Kommunikationsmodell nach SCHULZ VON THUN [Sch01, S. 14]

Die vier Seiten einer Nachricht führen häufig zu Problemen in der zwischenmenschlichen Kommunikation. So kann es sein, dass der Empfänger der erhaltenden Sachinformation zustimmt, die Beziehungsbotschaft oder den Appell hingegen ablehnt, weil er sich „geschulmeistert“ fühlt. Eine Möglichkeit, Abhilfe zu schaffen, bietet die *Metakommunikation*. Hierbei handelt es sich um den Versuch, aus einer gewissen Distanz über die Nachricht und ihre Botschaften zu sprechen. Diese „*Kommunikation über Kommunikation*“ [Sch01, S. 91] findet in der Regel retrospektiv statt, d. h. dann, wenn das Kommunikationsproblem bereits aufgetreten ist. Ist ein Konflikt oder eine kritische Situation absehbar, kann die Methode der *Moderation* [Sei04] genutzt werden, um die Kommunikation zu verbessern. Eine Moderation umfasst „*alle Bemühungen zweier Menschen, den Meinungs- und*

*Willensbildungsprozess einer Gruppe zu ermöglichen und zu erleichtern, ohne inhaltlich einzugreifen und zu steuern*“ [KSS02, S. 3]. Moderation findet in vielen Bereichen statt. SEIFERT unterscheidet zwischen „*Unterhaltungsmoderation*“, „*Business-Moderation*“ und „*Journalistischer oder Informations-Moderation*“ [Sei04, S. 166].

Dass Störungen der zwischenmenschlichen Kommunikation den Wissenstransfer behindern, ist einsehbar. Sie stellen jedoch nicht die einzige Barriere des interdisziplinären Wissenstransfers dar. Nach HEPPNER kann ein Wissenstransfer auf drei Ebenen stattfinden [Hep97, S. 187 ff.]:

- Wissenstransfer auf individueller Ebene
- Wissenstransfer auf Gruppenebene
- Wissenstransfer auf organisatorische Ebene

Auf der individuellen Ebene finden Interaktionsprozesse zwischen einzelnen Individuen statt. Der Wissenstransfer umfasst hier in erster Linie Lernprozesse. Interaktionen zwischen einem Individuum und der kollektiven Wissensbasis einer empfangenden oder sendenden Organisationseinheit werden von HEPPNER als Gruppenebene bezeichnet. Diese Ebene umfasst einen Sozialisationsprozess, in dem das Individuum die Denk- und Handlungsweisen einer Organisationseinheit lernt und so zu einem Mitglied dieser Einheit wird [Hep97, S. 212]. Dieser Fall tritt z. B. ein, wenn ein Biologe sich mit ingenieurwissenschaftlichen Themen beschäftigt, um einschätzen zu können, ob eine Idee, die im Rahmen seiner Forschungstätigkeit entstand, technisch realisierbar ist. Interagieren hingegen kollektive Wissensbasen miteinander, ist von einem Wissenstransfer auf organisatorischer Ebene die Rede [Hep97, S. 188]. Der Wissenstransfer zwischen verschiedenen Organisationseinheiten ist dabei mit einer Akkulturation, d. h. einer mit einer Anpassung der Organisationskulturen, verbunden. Eine kulturelle Anpassung erfolgt dann, wenn der Empfänger das Deutungsmuster des Senders übernimmt oder Sender und Empfänger ein gemeinsames Deutungsmuster erarbeiten [Hep97, S. 225 f.]. Für die Bionik bedeutet dies letztlich, dass der interdisziplinäre Wissenstransfer auch bestehende Strukturen und das vorherrschende Denken in den beteiligten Fachbereichen verändert.

Der Wissenstransfer auf den genannten Ebenen findet nicht unabhängig voneinander statt. HEPPNER sieht die drei Ebenen hierarchisch miteinander verbunden, d. h. der Wissenstransfer in einer höheren Ebene schließt Transferprozesse in der darunterliegenden Ebene ein [Hep97, S. 188]. So ist ein Wissenstransfer zwischen zwei Organisationseinheiten immer auch mit Sozialisationsprozessen einzelner Individuen verbunden, die wiederum auf Lernprozessen in der individuellen Ebene basieren.

In dieser Arbeit stehen die Kommunikation der am Produktentwicklungsprozess beteiligten Personen und der damit verbundene Wissenstransfer im Mittelpunkt. Daher sollen im Folgenden vordergründig die Barrieren, die den Wissenstransfer auf der individuellen Ebene betreffen, näher beleuchtet

werden. Der Wissenstransfer auf der organisatorischen Ebene und der Gruppenebene bleiben hingegen weitestgehend unberücksichtigt.

### 5.3.2 Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren

Aufbauend auf den obigen Betrachtungen soll im Folgenden ein Kommunikationsmodell für das bionische Arbeiten vorgestellt werden. Dabei ist festzustellen, dass das Modell, auch wenn es an dieser Stelle lediglich aus der Sicht der Bionik diskutiert wird, nicht auf den Wissenstransfer zwischen Biologie und Ingenieurwissenschaften beschränkt ist. In einer allgemeineren Betrachtungsweise lässt es sich auch zur Beschreibung der Kommunikation und des Wissenstransfers in anderen Bereichen nutzen.

Kern des Kommunikationsmodells stellt das in Kapitel 5.2 diskutierte bionische Analogiemodell dar. Ziel dieses Ansatzes war es, Aspekte der betrachteten Wissensdomänen aufeinander abzubilden und ein ganzheitliches Analogiebild aufzubauen, um hierdurch ein tieferes Verständnis der Problemstellung und erste Lösungsansätze zu gewinnen. Dem Mapping-Prozess geht eine Phase voraus, in der der Produktentwickler ausgehend von der ersten Assoziation weitere Aspekte finden und ihre Bedeutung für den Analogiebildung einschätzen muss. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Produktentwickler in seinem Wissensbereich ein Experte, auf dem der Biologie hingegen ein fachlicher Laie ist. Aus diesem „Ungleichgewicht des Wissens“ ergeben sich Probleme bei der Einschätzung der Aspekte, die sich außerhalb der Kompetenz des Produktentwicklers befinden. Infolgedessen kann auch der Mapping-Prozess und die Bildung des ganzheitlichen Analogiemodells negativ beeinflusst werden. Durch die Kommunikation mit einem Biologen kann diesem Ungleichgewicht entgegengewirkt werden. Das Beziehungsnetzwerk, das aus dieser Kommunikation entsteht, wird im Bild 5.14 verdeutlicht.

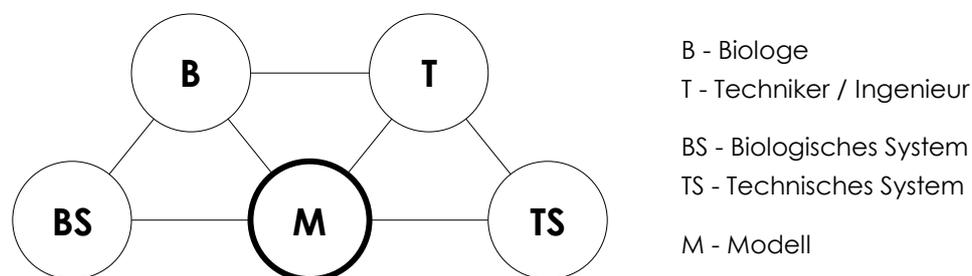


Bild 5.14: Beziehungsnetzwerk zwischen Biologen und Ingenieuren

Wie im Bild zu erkennen ist, besteht das Modell aus fünf Elementen: Dem Biologen (B), dem Ingenieur (T), dem technischen und dem biologischen System (BS, TS) sowie dem bionischen Analogiemodell (M). Das Analogiemodell steht im Zentrum des Geschehens. Es verbindet einerseits das biologische und das technische System, andererseits hat es auch Verbindungen zum Biologen und

zum Produktentwickler. Weitere Beziehungen existieren zwischen dem Biologen und dem biologischen System, zwischen dem Ingenieur und dem technischen System und nicht zuletzt auch zwischen dem Ingenieur und dem Biologen. Im Folgenden soll dieses Beziehungsnetzwerk etwas detaillierter dargestellt werden.

Den Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet das technische System. Hierbei kann es sich einerseits um ein bereits real existierendes Produkt handeln, bei dem ein Problem auftritt, für das eine Lösung gefunden werden soll, andererseits kann es auch als eine noch zu entwickelnde technische Lösung aufgefasst werden. In beiden Fällen kann der Produktentwickler bei der Lösungsfindung auf Hindernisse stoßen, die er mit herkömmlichen Mitteln nicht lösen kann. Wie im Kapitel 4.3.3 dargestellt wurde, ist er dann gezwungen, seinen Lösungsraum zu erweitern und auch in anderen, fachfremden Gebieten wie der Biologie nach Anregungen zur Lösung des Problems zu suchen. Da der Produktentwickler in diesen Gebieten kein Experte sein wird, hat er die Möglichkeit, Kontakt zu einem Biologen zu suchen und so das fehlende Wissen „einzukaufen“. Dem Biologen kommt also die Funktion eines Vermittlers zu. Er weiß, welche Lösungen die Natur hervorgebracht hat, und kann dieses Wissen dem Produktentwickler zur Verfügung stellen<sup>9</sup>. Es ist einsehbar, dass nicht jedes Detail des biologischen Systems für die Lösung der technischen Problemstellung relevant ist. Um das Wesentliche vom Unwesentlichen trennen zu können, sind zwischen dem Biologen und dem Produktentwickler intensive Abstimmungen notwendig. Der Biologe muss einerseits das technische Problem verstanden haben und dem Produktentwickler die biologischen Lösungen, die Anregungen für die Lösungsfindung liefern, erklären können. Andererseits ist der Produktentwickler gefordert, den „Spielraum“ für die Lösungsfindung abzugrenzen und dem Biologen zu vermitteln. In diesem Dialog entsteht das in Kapitel 5.2 beschriebene bionische Analogiemodell. Es beinhaltet Aspekte des biologischen Systems und solche des technischen Systems und zeichnet ein ganzheitliches Bild der Analogie. Der Produktentwickler ist so in der Lage, das Potential, aber auch die Grenzen der Analogie besser abzuschätzen.

Die Kommunikation zwischen Biologen und Produktentwicklern kann nicht nur, wie oben dargestellt, die Lösungsfindung in der Produktentwicklung unterstützen. In umgekehrter Weise kann sie dem Biologen unter Umständen auch helfen, biologische Systeme zu beschreiben. Dass Vergleiche in dieser Richtung ebenfalls sinnvoll und zielführend sein können, zeigt NACHTIGALL anhand einiger Beispiele [Nac98c]. So wurde das Beingelenk eines Käfers um 1900 in der sehr technischen Sichtweise eines Maschinenbauers als „Halbmondgelenk“ beschrieben [Nac98c, S. 36 f.]. Auch wenn diese Vergleiche heute sehr naiv und direkt erscheinen, so waren sie doch im Wesentlichen korrekt und halfen dem Verständnis der biologischen Systeme.

---

<sup>9</sup> Die Barrieren, die mit einer fachübergreifenden Kommunikation verbunden sind, werden im Kapitel 5.3.3 diskutiert.

Die Nutzung technisch-physikalischen Wissens zur Beschreibung biologischer Strukturen und Vorgänge definiert nach Ansicht von NACHTIGALL die Technische Biologie [Nac97, S. 8]. Wird dieses Wissen durch einen Ingenieur bereitgestellt, vertauschen sich die Rollen innerhalb des oben vorgestellten Kommunikationsmodells. Der Ingenieur nimmt Vermittlerrolle ein, und der Biologe ist der „Nutznießer“.

Die Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren ist im Rahmen des vorgestellten Modells nicht als einseitige Kommunikation zu sehen, bei der entweder wie im ersten Fall Wissenstransfer vom Biologen zum Ingenieur erfolgt oder wie im zweiten Fall der Biologe vom Ingenieur lernt. Tatsächlich ist die Kommunikation immer als Dialog zu verstehen. So kann z. B. eine technische Beschreibung eines biologischen Systems nicht nur dem Biologen, sondern auch dem Produktentwickler beim Verständnis helfen. Die Beschreibungen, die für die Wissensvermittlung notwendig sind, sollten innerhalb der Diskussion gefunden werden. Dies setzt voraus, dass der Wissenstransfer im Kommunikationsmodell als gegenseitiger Lernprozess aufgefasst wird, bei dem durch die wechselseitigen Erklärungen Synergieeffekte auftreten, die auf beiden Seiten zu einem umfassenden Verständnis führen.

Wenn bislang von *dem* Biologen und *dem* Ingenieur die Rede war, so waren Fachexperten gemeint, deren Wissensprofile sich deutlich voneinander unterscheiden. Die Kommunikation erfolgte mit dem Ziel, die Wissensprofile aufeinander abzubilden und im Hinblick auf die Lösung der Problemstellung zu ergänzen. Doch wie sieht das „typische“ Wissensprofil eines Biologen oder das eines Ingenieurs aus? In der Tat dürfte diese Frage schwer zu beantworten sein. Sowohl Biologen als auch Ingenieure sind heute in der Regel hochspezialisierte Experten. Sie sind in der Lage, Fragen zu ihrem Spezialgebiet kompetent zu beantworten, müssen jedoch bei Fragen, die nicht ihr Gebiet betreffen, unter Umständen auf andere Experten verweisen. Zwar lernen sowohl Ingenieure als auch Biologen in ihrem Studium die Grundlagen ihrer Fachgebiete, doch es ist einsehbar, dass z. B. jemand, der im Rahmen der Neurobiologie den Aufbau und die Funktionsweise von Sinnesorganen einer bestimmten Tierart erforscht, bei Fachfragen zum Thema Pflanzenmorphologie „passen“ muss. Es kommt demnach darauf an, die „richtigen“ Experten zusammenzuführen. Gelingt dies nicht, ist auch der Wissenstransfer nicht gewährleistet.

Das Finden und Zusammenbringen der „richtigen“ Experten ist jedoch nur eine Barriere, die im Alltagsgeschäft den interdisziplinären Wissenstransfer verhindert. Im Folgenden sollen weitere Barrieren diskutiert und Ansätze zu deren Überwindung aufgezeigt werden.

### 5.3.3 Barrieren des interdisziplinären Wissenstransfers

Bionik steht wie kaum eine andere Wissenschaft für ein fachübergreifendes Denken und Arbeiten. Doch auch wenn heute das „*Bild eines runden Tisches mit Biologen, Ingenieuren, Physikern, Chemikern und Geschäftsleuten nichts Exotisches mehr*“ [CBN05, S. 17] ist, so kann es doch auch noch längst nicht als Normalfall gelten. Projekte, in denen Biologen und Ingenieure gemeinsam arbeiten, stellen immer noch die Ausnahme dar. „*Der Blick über den Zaun ist Einzelnen überlassen worden*“, resümiert NACHTIGALL treffend [Nac98a, S. XIV]. Die Zusammenarbeit und somit auch der Wissenstransfer zwischen den beiden Fachgebieten wird vor allem durch folgende Barrieren behindert:

- Fehlende Querverbindungen im Arbeitsumfeld
- Unterschiedliche Zielstellungen und Methoden
- Unterschiedliche Wissensprofile
- Sprachbarrieren

Querbeziehungen zwischen Biologie und Technik haben, wie NACHTIGALL feststellt, eine lange Tradition [Nac98c, S. 36]. So waren in der Biologie, wie bereits dargestellt wurde, Kenntnisse des Ingenieurwesens häufig ausschlaggebend für das Verständnis biologischer Systeme. Darüber hinaus haben technische Geräte wie z. B. das Mikroskop entscheidend zum Fortschritt in der Biologie beigetragen. Andererseits kennt die Geschichte eine Reihe von Beispielen, in denen Ingenieure bemüht waren, das Wissen der Biologie in die Entwicklung technischer Produkte einfließen zu lassen oder gar versuchten, biologische Systeme „nachzubauen“. Dennoch ist festzustellen, dass sich Biologie und Ingenieurwissenschaften parallel und weitestgehend unabhängig voneinander entwickelt haben. Die oben skizzierten Querverbindungen entstanden häufig zufällig und sind oft auf die Initiativen Einzelner zurückzuführen. Sie reichten nicht aus, um eine „gemeinsame Basis“ zu schaffen, von der Biologie und Ingenieurwissenschaften gleichermaßen profitieren.

Die Bionik versucht dies nachzuholen und Biologen und Ingenieure einander näher zu bringen. Bionik findet heute in der Regel auf der Basis persönlicher Kontakte statt. Wo sie existieren, werden sie erfolgreich gelebt. Beim Knüpfen neuer Kontakte hingegen tun sich beide Seiten schwer. Es ist daher notwendig, Foren zu schaffen, auf denen sich Biologen und Ingenieure begegnen. Gegenwärtig werden aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorrangig auf fachspezifischen Konferenzen präsentiert, die entweder von Biologen oder von Ingenieuren besucht werden. Analog verhält es sich mit Publikationen in Fachzeitschriften.

Auch wenn sich zunehmend Foren etablieren, die sich sowohl an Biologen als auch Ingenieure richten, so ist doch festzustellen, dass es bislang nur relativ wenige Entwicklungsprojekte gibt, in denen

Bionik im engeren Sinn betrieben wird. In den meisten Bionik-Projekten werden Grundlagenfragen behandelt. Diese Tatsache lässt zwei Dinge vermuten. Zum einen kann dieser Umstand als ein Indiz dafür angesehen werden, dass die bestehenden Kontakte nicht ausreichen, um anwendungsorientierte Projekte, die eine intensive Zusammenarbeit zwischen Biologen und Ingenieuren voraussetzen, aufzusetzen. Zum zweiten kann vermutet werden, dass die „Qualität des verfügbaren biologischen Wissenspools“ im Hinblick auf eine Nutzung im Rahmen der Produktentwicklung nicht ausreichend ist. Für eine technische Nutzung sind detaillierte Informationen und ein tieferes Verständnis der biologischen Systeme notwendig. Es wird Wissen benötigt, das über die Erkenntnisse, die bislang im Rahmen biologischer Grundlagenforschung gewonnen wurden, hinausgeht.

Eine weitere Barriere stellen die unterschiedlichen Zielstellungen, Methoden und Rahmenbedingungen der beiden Wissenschaften dar. So beschäftigt sich die Biologie mit der Beschreibung der lebendigen Natur, der Organisation und der Entwicklung von Individuen sowie mit Fragestellungen, wie Individuen untereinander und mit ihrer Umwelt interagieren. Die Ingenieurwissenschaften hingegen befassen sich vorrangig mit der Entwicklung und Konstruktion technischer Produkte. Sie nutzen dazu naturwissenschaftliche Erkenntnisse, Gesetzmäßigkeiten und Regeln. Während der Biologe auf das Erkennen funktioneller Zusammenhänge fokussiert, *konstruiert* der Ingenieur Zusammenhänge [Bli92, S. 136].

In der Biologie wird im Wesentlichen Grundlagenforschung betrieben. In den Ingenieurwissenschaften hingegen stehen industrienah und anwendungsbezogene Forschungsaspekte im Vordergrund. Daraus resultieren unterschiedliche Verfahrensweisen. Während die Grundlagenforschung ergebnisoffen und zweckfrei, d. h. ohne einen zukünftigen Nutzen oder eine Anwendung im Blick zu haben, erfolgt, steht bei der sogenannten Angewandten Forschung immer ein konkretes Problem und eine Zielstellung im Hintergrund. Die Forschungsergebnisse fließen hier unmittelbar in die Praxis zurück. Die Angewandte Forschung ermöglicht die Verbesserungen bestehender Technologien. Sie führt in der Regel nicht zu „*Durchbruchsinnovationen*“ [Sim99, S. 7]. Da mit der Angewandten Forschung ein konkretes Ziel verfolgt wird, sind überraschende Entdeckungen und damit Innovationen nur von der zweckfreien Forschung zu erwarten [CBN05, S. 18].

Neben der Art des Forschungszieles unterscheiden sich Grundlagenforschung und Angewandte Forschung zudem in den Randbedingungen. Die Angewandte Forschung wird in wesentlichen Teilen durch Unternehmen finanziert. Sie muss sich somit auch an deren wirtschaftliche Rahmenbedingungen orientieren. Nicht selten ist mit der Angewandten Forschung ein Projektmanagement mit Meilensteinen und Ressourcenplanung verbunden. Die Grundlagenforschung hingegen wird in erster Linie durch die öffentliche Hand gefördert. Da hier ergebnisoffen und ohne konkrete Termine ge-

forscht wird, können die Rahmenbedingungen in der Grundlagenforschung als weniger restriktiv bezeichnet werden.

Biologische Systeme lassen sich nur selten durch mathematische Formeln beschreiben<sup>10</sup>. Dies unterscheidet die Biologie von der Chemie und der Physik, wo die Mathematik einen deutlich höheren Stellenwert hat. Insofern kommt der Biologie in den Naturwissenschaften eine gewisse Sonderstellung zu. Die Ingenieurwissenschaften sind gleichfalls „mathematisch geprägt“. Berechnungen spielen hier eine bedeutende Rolle. Vor diesem Hintergrund scheint es einleuchtend, dass der Ingenieur eher geneigt ist, Erkenntnisse der Physik und der Chemie zu nutzen, als die der Biologie aufzugreifen. Folglich ist für das Wissen der Biologen von Seiten des Ingenieurs keine „Nachfrage“ vorhanden. Auf der anderen Seite existiert auch kein „Angebot“ des Biologen an den Ingenieur, denn dieser hat auf den ersten Blick keinen direkten Nutzen, wenn er sein Wissen dem Ingenieur zur Verfügung stellt. Eine Zusammenarbeit findet daher nur dort statt, wo beide Seiten die Vorteile einer Kooperation erkennen.

Als letzter Punkt sollen an dieser Stelle die unterschiedlichen Wissensprofile von Biologen und Ingenieuren sowie Sprachbarrieren zwischen ihnen thematisiert werden. Der Austausch von Wissen ist, wie bereits dargestellt wurde, eng an Kommunikation gebunden. Kommunikation hingegen basiert zu einem großen Teil auf Sprache. Eine gemeinsame Sprache zwischen Sender und Empfänger bildet daher die Voraussetzung für einen Transfer von Wissen.

Die Arbeitsteilung und die Spezialisierung innerhalb der Gesellschaft führten zur Ausbildung von Fachsprachen [Hof76, S. 21], die für Außenstehende nicht unmittelbar verständlich sind. Fachsprachen sind allgegenwärtig. Typische Situationen, in denen Personen mit fachspezifischen Termini konfrontiert werden, sind z. B. Arztbesuche oder Behördengänge [LN89; PS89]. Sender und Empfänger haben in all diesen Situationen sehr unterschiedliche Wissensprofile, die nicht selten zu Kommunikationsproblemen führen.

Kommunikationsprobleme, die bei der Verständigung von Personen aufgrund einer Wissensasymmetrie auftreten, werden im Rahmen der Experten-Laien-Kommunikation untersucht [BR01; BJ03]. Experten werden vielfach als Fachleute beschrieben, „*die komplexe berufliche Anforderungen bewältigen, für die sie sowohl theoretisches (wissenschaftsbasiertes und akademisch vermitteltes) Wissen als auch praktische Erfahrungen haben sammeln müssen*“ [BR01, S. 542]. Laien hingegen sind Personen, „*die zwar von den Problemen betroffen sind, für die die Experten zuständig sind, denen aber die Ausbildung für eine eigenständige Problemlösung fehlen*“ [BJ03, S. 20]. HESSE stellt heraus, dass sich Experten und Laien über Handlungsmuster definieren, die sich im Zusammenleben der Men-

---

<sup>10</sup> Eine Ausnahme bilden Gesetzmäßigkeiten wie der Goldene Schnitt, der bei vielen biologischen Systemen gefunden werden kann (vgl. Kapitel 6.2.5)

schen herausgebildet haben. Die Muster werden sowohl in der Erwartung der Handlungspartner als auch in den Sanktionen, mit denen diese auf die Verletzung der Erwartungen reagieren, deutlich [Hes98, S. 11]. Des Weiteren zeigt HESSE, dass es neben Experten und Laien noch ein drittes weit verbreitetes Handlungsmuster – das des Dilettanten – gibt [Hes98, S. 11]. Es bezeichnet einen *Laien mit fachmännischem Ehrgeiz*. Dilettanten haben ihr Wissen zumeist autodidaktisch erworben. Ihre Handlungen sind intrinsisch motiviert. Diese Kriterien treffen auch auf Bioniker zu. Ein Bioniker „entsteht“ heute zumeist, indem sich ein Biologe oder ein Ingenieur im Selbststudium und aus eigenem Antrieb heraus Expertenwissen der jeweils anderen Wissensdomäne aneignet. Bioniker weisen somit die für einen Dilettanten typischen Handlungsmuster auf. Für die weitere Diskussion der Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren soll jedoch das Handlungsmuster des Dilettanten nicht gesondert betrachtet werden. Der Dilettant wird im Folgenden vielmehr als „Laie mit etwas mehr Fachwissen“ verstanden, so dass das duale Muster von Experte und Laie aufrechterhalten werden kann.

Die Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren kann, wie oben angedeutet wurde, als Experten-Laien-Kommunikation aufgefasst werden. BROMME & JUCKS machen darauf aufmerksam, dass bei einer interdisziplinären Kommunikation die Rollen innerhalb eines Gespräches mehrfach wechseln können [BJ03, S. 20]. Der Experte wird so zum Laien und umgekehrt. Der Wissenstransfer zwischen Experten und Laien ist nicht wie bei der Experten-Novizen-Kommunikation explizit pädagogischer Natur. Dennoch sind Erklärungen notwendig, die ein Verstehen gewährleisten. In der Regel ist es nicht problemlos möglich, Fachbegriffe durch alltagssprachliche Begriffe zu ersetzen. Die Ursache ist in der Tatsache zu suchen, dass Fachbegriffe für Experten nicht nur eine kommunikative Funktion haben, sondern zugleich die Grundlage ihrer kategorialen Wahrnehmung bilden [BR01, S. 543]. Der Experte muss sein Wissen zunächst dekodieren, bevor er es kommunizieren kann.

Es hat sich gezeigt, dass Menschen in der Lage sind, innerhalb von Sekundenbruchteilen ihre Formulierungen an die Perspektive des Gesprächspartners anzupassen. Diese Umstellung erfolgt unbewusst. Eine derartige Antizipationen des Wissens des Gesprächspartners und das darauf basierende Anpassen der Kommunikationsbeiträge auf die *vermutete* Perspektive des Gesprächspartners kann auch misslingen. Die Anpassung schlägt vor allem dann fehl, wenn die Experten das (fehlende) Wissen der Laien und deren Perspektive auf das Gesprächsthema nicht realistisch einschätzen können [BJ03, S. 22]. Dieses Problem kommt besonders dann zum Tragen, wenn die Wissenskommunikation nicht persönlich, sondern rechnerunterstützt erfolgt. Durch die zeitversetzte, schriftliche Kommunikation hat der Experte kaum eine Möglichkeit, das Vorwissen des Laien einzuschätzen. Ihm fehlt die Möglichkeit der schnellen Rückmeldung, die im Alltag z. B. durch die Interpretation von Gestik und Mimik gegeben ist (nonverbale Kommunikation). Auf der anderen Seite eröffnen sich mit der rech-

nerunterstützten Wissenskommunikation auch neue Möglichkeiten. So können erklärende Grafiken und Bilder besser in die Kommunikation eingebunden werden. Darüber hinaus ist die schriftliche Kommunikation langlebiger, da sie gespeichert und gegebenenfalls nachgelesen werden kann [BJ03, S. 24].

### 5.3.4 Weitere Dimensionen des Kommunikationsmodells

Das Kommunikationsmodell wurde bislang hinsichtlich des Wissenstransfers zwischen Personen diskutiert. Gemäß der Unterscheidung nach HEPPNER [Hep97, S. 187 ff.] wurde der Wissenstransfer vor allem auf der individuellen Ebene betrachtet. Die Gruppenebene und die organisatorische Ebene blieben hingegen weitestgehend unberücksichtigt. Wenn im Folgenden untersucht werden soll, inwiefern sich das Kommunikationsmodell auf andere Betrachtungsebenen ausweiten lässt, ist zu beachten, dass HEPPNER die Aufteilung der Ebenen im Hinblick auf die Betrachtung von Sozialisations- und Akkulturationsprozessen vorschlägt. Da derartige Prozesse im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden, ist zu hinterfragen, ob die von HEPPNER gewählte Einteilung für die weitere Diskussion zweckmäßig ist.

Tatsächlich stehen bei HEPPNER die Beziehungen zwischen Sender- und Empfängereinheit im Mittelpunkt. So werden auf der individuellen Ebene Beziehungen zwischen Individuen untersucht, auf der Gruppenebene stehen Relationen zwischen Individuum und Gruppe im Vordergrund und auf der organisatorischen Ebene werden Beziehungen zwischen verschiedenen Gruppen diskutiert. Für die weiteren Betrachtungen werden daher zwar die von HEPPNER gewählten Bezeichnungen der Ebenen, nicht aber die von ihm vorgeschlagenen Bedeutungen übernommen. Der bislang diskutierte Wissenstransfer zwischen dem Biologen und dem Ingenieur soll im Folgenden als Gruppenebene bezeichnet werden, da die Kommunikation hier *innerhalb* einer Gruppe stattfindet. Analog dazu werden im Folgenden der Wissenstransfer zwischen Individuum und Organisation als organisatorische Ebene und der Transfer „innerhalb“ des Individuums als individuelle Ebene bezeichnet.

Bezeichnung der Ebene	Bedeutung nach Heppner [Hep97]	Bedeutung im Kommunikationsmodell
Gruppenebene	Interaktionen zwischen einem Individuum und der kollektiven Wissensbasis	Wissenstransfer zwischen Biologen und Ingenieuren innerhalb des Entwicklungsteams
Individuelle Ebene	Interaktionsprozesse zwischen einzelnen Individuen	Wissenstransfer innerhalb eines Individuums
Organisatorische Ebene	Interaktionsprozesse zwischen verschiedenen Organisationseinheiten	Wissenstransfer zwischen Biologen bzw. Ingenieuren mit dem jeweils fremden Fachgebiet

Bild 5.15: Bedeutungen der Ebenen nach HEPPNER [Hep97] und im Kommunikationsmodell

Die Bildung von Analogien ist, wie im Kapitel 4.2 dargestellt wurde, eng mit den Denkprozessen verbunden. Analogiebildung ist demnach an Individuen gebunden. Des Weiteren ist festzustellen, dass Analogien unterschiedliche Sachverhalte verknüpfen, „von denen zumeist mindestens einer aus dem Gedächtnis abgerufen werden muß“ [Hes91, S. 5]. Um Analogien bilden zu können, muss die entsprechende Person „Altwissen“ mit „Neuwissen“ oder „Altwissen“ mit „Altwissen“ in Beziehung setzen. Diese Zuordnung von Wissen im Gehirn kann im übertragenen Sinne als „Wissenstransfer innerhalb des Kopfes“ angesehen werden, bei dem zunächst isolierte Bereiche im Gehirn, in denen das Wissen gespeichert wurde, durch einen „Kommunikationsprozess“ miteinander verknüpft werden.

Die „gedankliche Kommunikation“ kann vor allem dann zur Bildung des ganzheitlichen Analogiemodells genutzt werden, wenn die Person, die die Analogie bildet, in den zu verknüpfenden Fachbereichen über ein ausreichendes Wissen verfügt. Ein solches ausgeglichenes Wissensprofil ist vor allem bei Personen zu finden, die mehrere Professionen in sich vereinen (Universalgelehrte) oder die sich mit fachmännischem Ehrgeiz Wissen eines neuen Fachgebietes angeeignet haben (Dilettanten).

Ein Blick in die Geschichte der Bionik bestätigt diese Sichtweise. So war LEONARDO DA VINCI, der als Begründer der modernen Bionik gilt [Bra05], bekanntlich ein Universalgenie. Er war nicht nur Künstler und Philosoph, sondern auch Naturwissenschaftler und Ingenieur. Die Tatsache, dass er den Vogelflug analysierte und die gewonnenen Erkenntnisse für die Konzeption eigener Flugapparate nutzte, macht deutlich, dass er es verstand, unterschiedliche Wissensgebiete miteinander zu verbinden.

Als ein weiterer „früher Bioniker“ kann JOSEPH MONIER gelten. Er war Gärtner und hatte das Problem, dass seine Betonkübel fortwährend vom Wurzelwerk der Pflanzen zerstört wurden. Um den spröden Beton zu stabilisieren, legte er in den Mörtel ein Geflecht aus Rundeisen. Dieses später nach ihm benannte und noch heute verwendete „Moniereisen“ ist vermutlich dem Blattwerk von Pflanzen abgeschaut, wo spröde und zähe Materialien in ganz ähnlicher Weise miteinander kombiniert werden.

Wie die Beispiele zeigen, kann das Kommunikationsmodell auch als Erklärung für den „Wissenstransfer innerhalb des Kopfes“ dienen. Die Analogiebildung wird dabei als „Diskurs innerer Experten“ gesehen. Diese „Experten“ müssen sich – analog zu ihren realen Pendanten – zunächst finden und schließlich auch verstehen. Dass dieser Prozess nicht trivial und oft mit Problemen behaftet ist, zeigen Experimente der kognitionswissenschaftlichen Forschung [Hes91, S. 79 ff.]. Einmal mehr wird dabei deutlich, dass die Informationsverarbeitung im Gehirn ein äußerst komplexer Prozess ist. Es ist daher einsehbar, dass ein Modell, das die Analogiebildung als „Diskurs innerer Experten“ zu erklären versucht, die realen Prozesse im Gehirn nur in sehr grober Näherung darstellen kann.

Neben der Gruppen- und der individuellen Ebene kann das Kommunikationsmodell auch aus Sicht der organisatorischen Ebene interpretiert werden. Diese Ebene beschreibt die Beziehung des Individuums zur „Forscher-Gemeinschaft“. Dabei kann z. B. einerseits die Beziehung eines Biologen oder eines Ingenieurs zu „seiner“ Gemeinschaft betrachtet werden, andererseits lassen sich auch die Beziehungen zu einer fremden Gemeinschaft beleuchten. Für die Diskussion des Wissenstransfers in der Bionik ist der zuletzt genannte Fall der interessanter und soll daher hier aus der Sicht des Produktentwicklers dargestellt werden.

Es soll angenommen werden, dass ein Produktentwickler in einer fremden Wissensdomäne nach Anregungen für die Lösung seiner Problemstellung sucht. Ist ein Rückgriff auf früher gespeichertes Wissen (individuelle Ebene) nicht möglich, ist der Produktentwickler auf externe Wissensquellen angewiesen. In der Regel wird er zunächst über keine persönliche Kontakte zu Mitgliedern der fremden Gemeinschaft verfügen, so dass auch ein Wissenstransfer in der Gruppenebene nicht erfolgen kann. Dennoch bieten sich dem Produktentwickler Möglichkeiten, an das benötigte Wissen zu gelangen.

Einen ersten Zugang zum biologischen Wissen stellt das Internet und die entsprechende Fachliteratur dar. Obwohl die Informationsbeschaffung im Wesentlichen analog zu Recherchen im Bereich der Technik verläuft, ist sie mit Einschränkungen verbunden. So fehlen in der biologischen Fachliteratur, wie bereits früher angemerkt wurde, in der Regel Informationen, die für eine technische Umsetzung relevant sind. Zudem ist die Literatur für einen „Durchschnittsingenieur“ meist nur schwer verständlich, da sie in der Fachsprache der Biologen verfasst ist. Bei Publikationen im Internet ist ferner kritisch zu hinterfragen, ob der dargestellte Sachverhalt fachlich richtig ist. So findet GRAMANN bei der Recherche nach der Ursache der Kletterkünste von Steinböcken auf einer Internetseite die Behauptung, ihre Hufe würden wie Saugnäpfe wirken [Gra04, S. 102]. Zwar existiert eine gewisse strukturelle Ähnlichkeit (harter Rand und weiche Lauffläche), dennoch dürfte das zugrunde liegende Wirkprinzip ein anderes sein.

Der Wissenstransfer auf der organisatorischen Ebene kann als „unpersönlich“ charakterisiert werden. Ihm fehlt die Interaktion zwischen Sender (Gemeinschaft) und Empfänger (Individuum), die auf der individuellen und der Gruppenebene wesentlich stärker ausgeprägt sind. Die Vermittlung von Wissen bleibt daher einseitig. Zwar ist es denkbar, den Wissenstransfer im Rahmen der Bionik allein auf der organisatorischen Ebene durchzuführen (durch ein Selbststudium), diese Vorgehensweise ist wenig effizient, da die Person die relevanten Informationsquellen zunächst identifizieren muss, bevor sie sich das Wissen aneignen kann. Erfolgversprechender scheint der Ansatz, frühzeitig den Kontakt zu Experten des entsprechenden Fachgebietes zu suchen und in den direkten Dialog zu treten. Der Wissenstransfer wechselt in diesem Fall von der organisatorischen Ebene in die Gruppenebene.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass die diskutierten Ebenen untereinander vernetzt sind. So ist es einsehbar, dass das Wissen, das der Produktentwickler während des Selbststudiums erwirbt (organisatorische Ebene), auch auf der individuellen Ebene verarbeitet wird und hier zu Assoziationen führen kann. Analog verhält es sich mit dem Wissen, das den Produktentwickler während eines Dialogs mit einem Biologen erreicht (Gruppenebene). Auch in diesem Fall sind auf der individuellen Ebene entsprechende Prozesse zu erwarten. Zusätzlich bietet sich hier die Möglichkeit, dass die in der individuellen Ebene gewonnenen Erkenntnisse in die Gruppenebene zurückfließen und den Dialog beeinflussen. Verknüpfungen gibt es auch zwischen der organisatorischen und der Gruppenebene. So wird dem Wissenstransfer auf der Gruppenebene ein Prozess auf der organisatorischen Ebene vorausgehen, bei dem der Produktentwickler nach Experten recherchiert, die ihm das Wissen, das für die Lösung seiner Problemstellung relevant ist, vermitteln können.

#### **5.4 Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass bereits einige Modelle existieren, die die Bionik zu beschreiben versuchen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei jedoch um Orientierungsmodelle, die für Lösungsfindung in der Produktentwicklung nur grobe Anhaltspunkte liefern. Mit dem bionischen Analogiemodell, das den Wissenstransfer explizit als Mapping-Prozess auffasst und so zu einem ganzheitlichen Analogiebild führt, wird eine Herangehensweise vorgeschlagen, die sich in den Alltag des Produktentwicklers integrieren lässt. Das Modell ist skalierbar und führt den Produktentwickler schrittweise durch den Prozess.

Die Darstellungen machen ebenfalls deutlich, dass der Mapping-Prozess unter Umständen Kenntnisse voraussetzt, die in der notwendigen Tiefe nicht vom Produktentwickler erwartet werden können. Die notwendigen Informationen können dann durch das Hinzuziehen von Experten erworben werden. Der Zusammenarbeit von Experten kommt im Rahmen der Bionik eine besondere Bedeutung zu, da hier in aller Regel Fragestellungen diskutiert werden, die auf beiden Seiten Expertenwissen verlangen. Die bisherigen Übertragungsmodelle tragen diesem Sachverhalt nur ungenügend Rechnung. Zwar wird die Bedeutung der Kommunikation von den Autoren erkannt, sie spiegelt sich jedoch nicht in den Modellen wider.

Der Wissenstransfer hat für die Bionik zweifelsfrei eine große Bedeutung. Er findet in verschiedenen Dimensionen statt, die vielfach vernetzt sind. Zudem verläuft die Kommunikation nicht immer reibungsfrei. Dies gilt im Besonderen für die Kommunikation zwischen Experten und Laien. Aus dieser Komplexität erwächst die Notwendigkeit, den Transferprozess methodisch zu unterstützen. Im Folgenden sollen daher Methoden und Werkzeuge untersucht werden, die dem Produktentwickler helfen, Expertenwissen fremder Fachgebiete für Lösungsfindung nutzbar zu machen.

*Nach 20 Jahren Forschung haben wir verstanden,  
was Kerbspannung ist.*

*CLAUS MATTHECK*

## **6 Methoden und Werkzeuge der Bionik**

Im Kapitel 5.3.4 wurde dargestellt, dass der fachübergreifende Wissenstransfer prinzipiell auf drei Ebenen stattfinden kann. Die organisatorische Ebene beschreibt den „unpersönlichen Wissenstransfer“, der in erster Linie über Fachliteratur oder Medien wie dem Internet erfolgt. Im Gegensatz dazu basiert der Wissenstransfer auf der Gruppenebene maßgeblich auf Kommunikation und Interaktionen zwischen Experten. Auf der individuellen Ebene findet letztlich ein Rückgriff auf bereits früher gespeichertes Wissen statt. Der Wissenstransfer spielt sich hier im übertragenden Sinn im Kopf des Produktentwickler ab. Da der Prozess eng mit den Vorgängen im Gehirn verbunden ist, nimmt er eine gewisse Sonderstellung ein. Prozesse dieser Art werden innerhalb der kognitionspsychologischen Forschung untersucht. Für die folgenden Betrachtungen wird der Wissenstransfer auf der individuellen Ebene ausgeklammert, da die psychologischen Vorgänge im Gehirn in dieser Arbeit nicht thematisiert werden.

Der interdisziplinäre Wissenstransfer wird durch zahlreiche Barrieren behindert. Wie im letzten Kapitel diskutiert, gehören hierzu z. B. Probleme, die aus der Experten-Laien-Kommunikation resultieren, aber auch Publikationen, die in Fachsprache verfasst wurden. Da das fremde Fachwissen für den Produktentwickler oft nur schwer zugänglich ist, wird es im Rahmen der Lösungsfindung in der Regel nicht verwendet. Im Folgenden sollen daher Methoden und Werkzeuge diskutiert werden, die dem Produktentwickler dieses Wissen erstens zur Verfügung stellen und zweitens verständlich aufbereiten. Die Diskussion erfolgt dabei hinsichtlich der Ebenen des Kommunikationsmodells. Zunächst wird eine Methode vorgestellt, die in der Gruppenebene Kommunikationsbarrieren zwischen Biologen und Ingenieuren abbaut. Im Anschluss daran werden bereits existierende Ansätze diskutiert, die auf der organisatorischen Ebene den Zugang zum Fachwissen erleichtern und es so für die Lösungsfindung nutzbar machen. Darauf aufbauend wird im letzten Teil des Kapitels das Konzept für ein erweitertes Unterstützungssystem vorgestellt.

## 6.1 Unterstützung der Kommunikation zwischen Experten und Laien

Wie im Kapitel 5.3 dargestellt wurde, ist Kommunikation oft mit Problemen behaftet. Für die Experten-Laien-Kommunikation, die in dieser Arbeit im Vordergrund steht, wurden als wichtige Kommunikationsbarrieren fehlende Querverbindungen im Arbeitsumfeld, unterschiedliche Zielstellungen und Methoden, unterschiedliche Wissensprofile sowie Sprachbarrieren identifiziert. In diesem Abschnitt sollen die Wissensprofile und Sprachbarrieren näher betrachtet werden. Es wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem sich die Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieuren effizienter gestalten lässt.

### 6.1.1 Vorbetrachtungen

Die vier Seiten einer Nachricht wurden bereits im Kommunikationsmodell nach SCHULZ VON THUN im Kapitel 5.3.1 vorgestellt. Neben der Sachebene beinhaltet eine Nachricht einen Beziehungsaspekt, eine Selbstoffenbarung sowie einen Appell [Sch01, S. 25 ff.]. Die verschiedenen Botschaften einer Nachricht sind vielfältig miteinander verwoben und müssen vom Empfänger dekodiert werden. Das Ergebnis dieses Prozesses hängt in nicht unerheblichem Maße von den Erwartungen, den Befürchtungen und den Erfahrungen des Empfängers ab. Fehler, die beim Kodieren oder Dekodieren einer Nachricht auftreten, äußern sich in einer Kommunikation als Missverständnis und können sogar zum Konflikt führen. Jede der vier Seiten ist dabei mit spezifischen Problemen verbunden, die Ursache einer misslungenen Kommunikation sein können. Im Folgenden sollen lediglich die kommunikationspsychologischen Probleme der Sachebene erörtert werden, da auf dieser Ebene Faktenwissen, das für die Kommunikation von Biologen und Ingenieuren vordergründig eine Rolle spielt, übertragen wird.

SCHULZ VON THUN benennt mangelnde Sachlichkeit und unzureichende Verständlichkeit als wichtige Gründe für Kommunikationsprobleme in der Sachebene [Sch01, S. 129 ff.]. Mangelnde Sachlichkeit kommt in unsachlich geführten Diskussionen und im Abschweifen von Thema zum Ausdruck. Kommunikationspsychologen empfehlen in diesem Fall, über die Störung im Rahmen der Metakommunikation zu sprechen („Störungen haben Vorrang“ [Sch01, S. 132]). Die Verständlichkeit einer Nachricht wird durch die folgenden vier Faktoren beeinflusst [Sch01, S. 142]:

- Einfachheit
- Gliederung, Ordnung
- Kürze, Prägnanz
- zusätzliche Stimulanz (z. B. durch Zeichnungen, sprachliche Bilder und Beispiele)

Obwohl sich eine verständliche Informationsvermittlung trainieren lässt, kann es in vielen Fällen sinnvoll sein, einen Kommunikationshelfer hinzuzuziehen, der sich „als Hebamme klarer 'quadratischer' Nachrichten und als einfühlsamer Anwalt förderlicher Interaktionsregeln“ [Sch01, S. 93] versteht. Bei einer klassischen Moderation ist dieser Kommunikationshelfer ein Methodenspezialist. Der Moderator „trägt Verantwortung dafür, dass die Gruppe ein Ergebnis erarbeiten kann, nicht für dessen inhaltliche Qualität“ [Sei04, S. 88]. Er ist nicht Teil der Gruppe, sondern hält sich inhaltlich bewusst zurück, um den Gruppenmitgliedern einen möglichst großen Freiraum für die inhaltliche Arbeit zu geben. Die moderierende Person konzentriert sich auf das Gruppengeschehen. Sie leitet die Diskussion und visualisiert die Beiträge der Teilnehmer.

Generell besteht die Möglichkeit, die Kommunikation zwischen Experten und Laien als moderiertes Gespräch zu gestalten. Im Folgenden soll jedoch eine Alternative zur klassischen Moderation vorgestellt und diskutiert werden. Es handelt sich dabei um eine Gesprächsform, mit der ein Teil der methodischen Kompetenz des Moderators in die Gesprächssituation übertragen wird.

### 6.1.2 Triadengespräche und interpunktierte Erzählungen

Der Wissenstransfer zwischen Biologen und Ingenieuren findet im einfachsten Fall in der Form eines dyadischen Gespräches<sup>1</sup> statt. Es kann angenommen werden, dass die auskunftgebende Person sich hinsichtlich der Struktur und der Art der Darstellung nach dem Zuhörer richtet und ihm das erzählt, was er versteht und was ihn interessiert. Auch wenn für diese Gesprächsform der Anspruch auf Verständlichkeit charakteristisch ist [Dic06, S. 146], können Missverständnisse nicht ausgeschlossen werden. Wie bereits in Kapitel 5.3.3 diskutiert, können als Ursache hierfür die unterschiedlichen Wissensprofile von Ingenieur und Biologen angesehen werden. Das Bild 6.1 stellt den Sachverhalt schematisch dar. Wie dort zu sehen ist, haben Ingenieur und Biologe in ihren jeweiligen Fachgebieten eine große Wissenstiefe, die jedoch mit zunehmender Entfernung von diesem Fachgebiet kontinuierlich abnimmt. Legt man die Wissensprofile übereinander, bildet sich eine „Schnittmenge“, auf deren Grundlage die Kommunikation erfolgen kann.

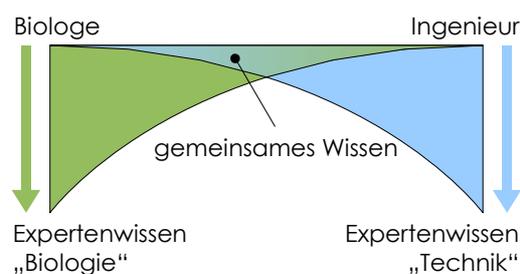


Bild 6.1: Wissensprofile von Biologen und Ingenieuren

<sup>1</sup> Dialog zwischen zwei Gesprächspartnern

Die Kommunikation zwischen den Experten gelingt nur dann, wenn während des Gespräches die „Schnittmenge des gemeinsamen Wissens“ nicht verlassen wird. Da es für die Gesprächspartner unter Umständen schwierig ist, zu entscheiden, wann sie diesen Bereich verlassen (vgl. Kapitel 5.3.3), wird vorgeschlagen, eine Gesprächssituation zu schaffen, in der die Gesprächspartner in dieser Hinsicht entlastet werden. Um dies zu erreichen, werden zwei bis drei weitere Gesprächsteilnehmer in den Kommunikationsprozess aufgenommen. Sie fungieren jedoch nicht als Moderator, sondern beteiligen sich aktiv an dem Gespräch.

Die Auswahl der zusätzlichen Gesprächsteilnehmer erfolgt anhand ihrer Wissensprofile. Sie sollten einerseits Kenntnisse der Biologie bzw. der Technik haben, andererseits sollten sich ihre Kenntnisse deutlich vom Expertenwissen abheben. Ziel ist es, in der Gruppe eine „kontinuierliche Wissensverteilung“ zu erreichen. Es wird erwartet, dass die Gesprächspartner durch diese Abstufung schneller zu einer gemeinsamen Sprache finden. Sollten sie Darstellungen oder Erklärungen verwenden, die für andere in der Gruppe nur schwer verständlich sind, können sich die Gesprächsteilnehmer in dieser Konstellation gegenseitig „zurückholen“. Die Nichtexperten können gegebenenfalls Aussagen der Experten umformulieren und für die Laien „übersetzen“. Es wird angenommen, dass diese Zusammensetzung der Gesprächsteilnehmer vor allem am Beginn einer Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren die Verständigung erleichtert. Da die Experten in dieser Phase das Wissen ihres Gegenübers oft nur wenig einschätzen können, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Verständigung misslingt, relativ hoch [BJ03, S. 22]. Die vermittelnde Funktion der Nichtexperten kann hier helfen, Kommunikationsbarrieren zu überwinden.

Bislang konnte die oben geschilderte Gesprächssituation noch nicht in der Praxis evaluiert werden. Die Überlegungen stützen sich im Wesentlichen auf eine Publikation, die DICK [Dic06] im Rahmen der *Experten-Novizen-Kommunikation* veröffentlicht hat. Das von ihm geschilderte Projekt beschäftigt sich mit der Weitergabe von professionellem Wissen in einem Technologieunternehmen. In dem konkreten Fall ging es um die Einarbeitung neuer Mitarbeiter. Erfahrene Mitarbeiter hatten hierzu Patenschaften übernommen. Sie fanden jedoch aufgrund der hohen Arbeitsbelastung kaum die Zeit, Gespräche mit den neuen Kollegen zu führen. Eine weitere Schwierigkeit bestand darin, dass die Gesprächspartner zum Teil über gemeinsames Wissen verfügten. Daraus ergab sich das Problem, dass der erfahrende Kollege sich häufig nicht bewusst war, in welchen Bereichen sein Gegenüber einen Bedarf an Informationen hatte. Der „Neuling“ auf der anderen Seite konnte nur schlecht einschätzen, an welcher Stelle er lediglich „Halbwissen“ besaß. In dieser Situation wurde eine dritte Person, ein fachlicher Laie, in das Gespräch einbezogen. Ziel war es, die Zuhörerschaft zu differenzieren und dadurch den Experten anzuhalten, *„im fortlaufenden Erzählentwurf gleichzeitig sowohl den konkreten Nutzen des Erzählten (für den einen Zuhörer) als auch dessen Verständlichkeit (für den*

anderen Zuhörer) zu berücksichtigen“ [Dic06, S. 146]. Der Laie fungiert innerhalb dieses *Triadengesprächs* als methodischer Zuhörer. Er ist nicht Teil des gemeinsamen Handlungsfeldes von Experte und Novize und hat im Gegensatz zum Novizen nicht den Anspruch, Wissen zu erwerben. Seine primäre Aufgabe ist es, das Verstehen zwischen Experten und Novizen sicherzustellen. Als Teilnehmer der Interaktion kann der methodische Zuhörer jedoch durch Zwischenfragen sein eigenes Verstehen einfordern oder den Novizen ermuntern, selbst Fragen zu stellen. [Dic06, S. 148].

Wie lässt sich dies nun in Bezug auf die Kommunikation von Biologen und Ingenieur nutzen? DICK verdeutlicht beispielhaft den Verlauf von drei Triadengesprächen. In einem der Beispiele zeigt sich, dass die angedachte Rollenverteilung aufgebrochen wird. Dabei kommt es jedoch nicht zu einer Neudefinition der Rollen, sondern zu einem Rollentausch. Der fachliche Zuhörer (Novize) übernimmt im Gespräch zum Teil eine strukturierende Funktion, die eigentlich dem methodischen Zuhörer zugeordnet war, später auch die erklärende Funktion des Experten [Dic06, S. 157]. Letzteres ist für Experten-Laien-Kommunikation, die hier im Mittelpunkt steht, von besonderem Interesse. Offensichtlich gelingt es im geschilderten Fall dem Novizen besser, dem Laien einen Sachverhalt zu erklären. Möglicherweise spielt hier die Tatsache eine Rolle, dass die „Wissenslücke“, die bei der Kommunikation überbrückt werden muss, zwischen Novizen und Laien weniger groß ist, als die Lücke zwischen Experten und Laien (Bild 6.2). Novize und Laie finden schneller zu einer gemeinsamen Sprache, so dass der Wissenstransfer nicht vom Experten zum Laien, sondern vom Novizen zum Laien stattfindet.

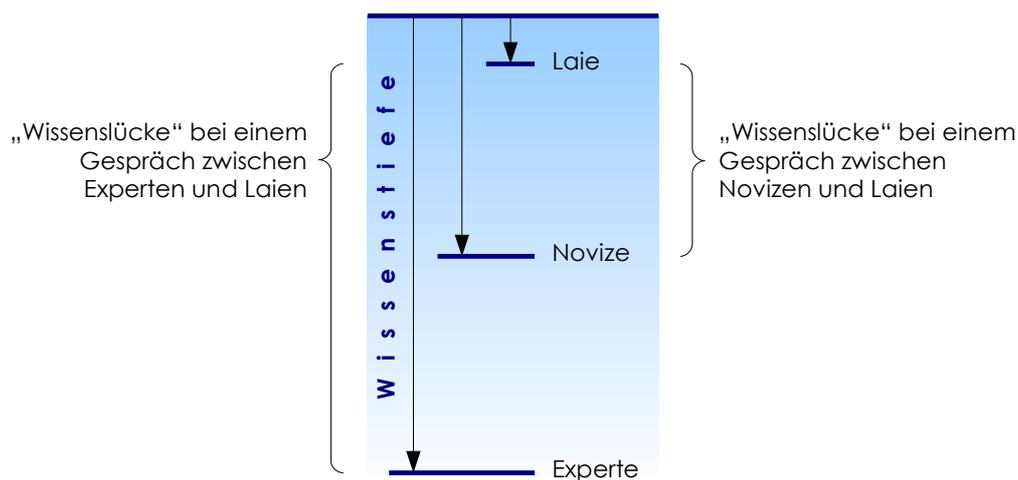


Bild 6.2: Wissenslücken bei der Kommunikation zwischen Experten und Laien sowie bei der Kommunikation zwischen Novizen und Laien

Auch wenn die von DICK beschriebene Problemstellung eine andere als die hier diskutierte ist, so lassen sich die Erkenntnisse doch zumindest teilweise auf den Wissenstransfer zwischen Biologen und Ingenieuren übertragen. Das Einbeziehen einer dritten Person ändert die Gesprächssituation grundlegend. Dies tritt um so stärker zu Tage, je mehr sich durch die zusätzliche Person das Wissen-

sprofil der Gruppe verändert. Bei der Experten-Novizen-Kommunikation, wie sie von DICK geschildert wird, liegen die Wissensprofile recht nah beieinander. Mit dem Laien kommt eine Person hinzu, deren Wissensprofil deutlich außerhalb von dem des Experten und dem des Novizen liegt (Bild 6.2). Das Wissensprofil der Gruppe wird dadurch „aufgeweitet“.

Wird der Kommunikationsprozess von Biologen und Ingenieur durch einen Novizen (z. B. durch einen Studenten der Biologie oder der Ingenieurwissenschaft) ergänzt, ist die Zusammensetzung der Gesprächspartner letztlich die gleiche wie bei einem Triadengespräch. Die dritte Person wird hier jedoch nicht genutzt, um eine Differenzierung des Wissensprofils der Gruppe zu erreichen, sondern um dessen Kontinuität zu verbessern.

Durch das veränderte Wissensprofil der Gruppe ändert sich auch der Kommunikationsprozess. Im Triadengespräch nach DICK ist der Laie ein methodischer Zuhörer. Er gewährleistet die verständliche Darstellung der kommunizierten Informationen. Bei der Kommunikation zwischen Biologen und Ingenieur kommt mit dem Novizen nicht ein weiterer Zuhörer, sondern ein „methodischer Erzähler“ in den Gesprächskreis. Aufgrund seiner größeren Nähe zum Laien kann er dessen fehlendes Wissen besser einschätzen als der Experte. Er kann in das Gespräch eingreifen, wenn er das Gefühl hat, Experte und Laie verstehen sich nicht. Unter Umständen ist es sinnvoll, die Rolle des Erklärenden vollständig oder zum Teil an den Novizen zu übertragen. Die Aufgabe des Experten ist es in diesem Fall darauf zu achten, dass die Darstellungen sachlich richtig sind.

### 6.1.3 Diskussion des Ansatzes

Die beschriebenen Interaktionen der Gesprächsteilnehmer in einem Triadengespräch lassen sich nicht allein durch die Tatsache begründen, dass in die Diskussion drei Personen involviert sind. Bei einem Triadengespräch haben Experte, Laie und Novize definierte Aufgaben. Diese Rollenverteilung trägt wesentlich zur charakteristischen Struktur dieser Gesprächsform bei. Durch die dritte Person wird das bestehende Duo zu einer „kleinen Gruppe“ erweitert. Ihr Zusammenwirken lässt bereits typische Gruppenprozesse deutlich werden [Bur01, S. 121 ff.]. Es wirken Synergieeffekte, die die Verständigung positiv beeinflussen. Das Triadengespräch kennt keine Hierarchieebenen. Die beteiligten Personen sind gleichberechtigte Kommunikationspartner. Für den Wissenstransfer vom Biologen zum Ingenieur, der durch einen Novizen ergänzt wird, kommt zusätzlich der Aspekt der Interdisziplinarität zum Tragen.

Da sich der Wissenstransfer in der oben beschriebenen Form vor allem auf die unterschiedlichen Rollen stützt, ist zu erwarten, dass bis zu einer gewissen Gruppengröße zusätzliche Personen die typische Gesprächsstruktur nur unwesentlich beeinflussen. Mit einer Erweiterung des Diskussionskreises werden jedoch auch Parallelen zur Organisationsform „interdisziplinäres Team“ deutlich. Das

interdisziplinär zusammengesetzte Team ist im Alltag der Produktentwicklung häufig anzutreffen (vgl. Kapitel 3.2.3). Vor allem im Rahmen der Integrierten Produktentwicklung (IPE) wird ein Arbeiten in dieser Form als förderlich angesehen, denn „*Teamarbeit kommt dem Anspruch an eine humane Arbeitsgestaltung durch mehr selbstbestimmte Tätigkeiten, ganzheitliche Arbeitsinhalte und vielfältige Anforderungen entgegen*“ [Bur01, S. 123]. Zudem ergeben sich aus der Arbeit im interdisziplinären Team Vorteile hinsichtlich einer größeren Vielfalt an betrachteten Lösungsvarianten sowohl für das Produkt als auch für den Entwicklungsprozess [Nau05, S. 70]. In einem interdisziplinär zusammengesetzten Team werden Personen mit verschiedenen Erfahrungen und Fachkompetenzen zusammengebracht. Sie alle sind nicht nur Experten in ihrem jeweiligen Fachgebiet, sondern haben auch mehr oder weniger stark ausgeprägte Kenntnisse anderer Fachdisziplinen. Dies wirkt sich positiv auf den Wissenstransfer innerhalb einer solchen Gruppe aus, da jedes Teammitglied in Abhängigkeit von dem Thema und der Gesprächssituation die Rolle des Experten, des Novizen oder des Laien übernehmen kann.

Vor diesem Hintergrund ist festzustellen, dass das interdisziplinär zusammengesetzte Team der Integrierten Produktentwicklung die ideale Voraussetzung für den Wissenstransfer zwischen Biologen und Ingenieuren bildet. Die Teammitglieder agieren in einer Netzwerkstruktur. In Abhängigkeit von den Aufgaben arbeiten sie entweder ständig im Kernteam oder nur zeitweise im erweiterten Team zusammen (vgl. Bild 3.3, S. 42). Der Biologe kann dabei dem erweiterten Team zugeordnet werden, der in der Phase der Lösungsfindung als Experte „in Sachen Biologie“ im Team mitarbeitet. Die Rollen von Novizen und Laien werden von den restlichen Teammitgliedern übernommen. Gibt es im Team keine Personen, die dem Wissensprofil des Novizen entsprechen, können, wie oben vorgeschlagen wurde, Studenten der Ingenieurwissenschaften oder der Biologie das Team ergänzen.

## **6.2 Bestehende Ansätze zur Unterstützung des Wissenstransfers**

Hat der Produktentwickler nicht die Möglichkeit, mit einem Biologen in den Dialog zu treten, bleibt ihm der Wissenstransfer über die organisatorische Ebene (vgl. Kapitel 5.3.4). Neben den Recherchen stehen dem Produktentwickler im Rahmen der Bionik verschiedene Werkzeuge und Methoden zur Verfügung, die im Folgenden dargestellt werden sollen.

### **6.2.1 Kataloge biologischer Konstruktionen**

HILL konstatiert, dass das „Erfinden mit der Natur“ vom Produktentwickler umfangreiche Kenntnisse über biologische System verlangt [Hil98a, S. 2]. Er stellt weiterhin fest, dass derartige Kenntnisse bislang nicht Bestandteil entsprechender Lehrprogramme sind. Um dem Produktentwickler diese Informationen dennoch zugänglich zu machen, hält er „*die Konzipierung eines für alle technischen*

*Disziplinen nutzbaren Arsenal biologischer Konstruktionen in der Sprache des technisch versierten Fachmannes*“ für sinnvoll [Hil98a, S. 2]. Als mögliche Umsetzung sieht HILL den bereits angesprochenen Katalog biologischer Konstruktionen<sup>2</sup>. Dieser Katalog verwendet „*Grundfunktionen als heuristisch nutzbare Analogieklassen*“, die „*aufgrund ihrer Abstraktion einen solchen Allgemeinheitsgrad, der sowohl für technische, als auch für biologische System zutrifft*“ [Hil98a, S. 2 f.], besitzen. Darüber hinaus wird durch die Nutzung von Grundfunktionen das Suchfeld erweitert. Der Produktentwickler ist somit nicht an spezielle Funktionen gebunden, sondern erhält einen Überblick über mögliche Prinzipien, die er zur Lösung des Problems einsetzen kann [Hil98b, S.85].

HILL beschreibt in mehreren Publikationen [Hil98a; Hil98b; Hil99] den prinzipiellen Aufbau eines solchen biologischen Lösungskatalogs anhand beispielhafter Seiten. Dabei ist festzustellen, dass die Darstellung des Kataloges selbst in den einzelnen Publikationen zum Teil in unterschiedlicher Form erfolgt. In allen Veröffentlichungen ist jedoch eine Systematisierung nach den Grundfunktionen und den Kategorien Stoff, Energie und Information zu finden (Bild 6.3). Sie wurde aus methodischen Gründen gewählt, um dem Produktentwickler die Zuordnung von Funktion und Struktur zu erleichtern. Aus dem gleichen Grund werden auch die biologischen Strukturen im Katalog als technische Systemelemente betrachtet. HILL erwartet von einer solchen Darstellung, dass „*Assoziationen zur Lösungsfindung systematischer generiert werden*“ [Hil98a, S. 4].

Wie im Bild 6.3 angedeutet, kann ein biologisches System in mehrerlei Hinsicht Anregungen zur Gestaltung technischer Lösungen liefern. So zeigen z. B. die Flügelkopplung oder der Genitalapparat am System „Schmetterling“ Lösungsmöglichkeiten zum Problemfeld „Verbinden von Stoff“ auf. Der Körper und der Rüssel des Insektes liefern Anregungen im Hinblick auf die Verformung von Stoffen, und die Struktur der Flügelschuppen stellt eine Inspirationsquelle zur Gestaltung von technischen Stütz- und Tragelementen dar [Hil98a, S. 84 ff.]. Wegen dieser Vielschichtigkeit legt HILL in seinem Katalog für jedes biologische Vorbild eine Art Übersichtsseite an. Auf dieser Seite benennt er die bionisch bedeutsamen Strukturen der biologischen Lösung und ordnet sie den Grundfunktionen zu. Auf den darauffolgenden Katalogseiten werden dann die Strukturen und ihre Funktionen – unterstützt durch Skizzen – näher erläutert. Hier sind auch Angaben zu weiterführender Literatur enthalten.

---

<sup>2</sup> Die Verwendung von Katalogen zur Unterstützung der Lösungssuche stellt aus konstruktionsmethodischer Sicht kein Neuland dar. Bedeutung haben vor allem die Kataloge von ROTH [Rot94] erlangt. Ein Vergleich der Kataloge biologischer Konstruktionen mit dem Ansatz von ROTH erfolgt weiter unten.

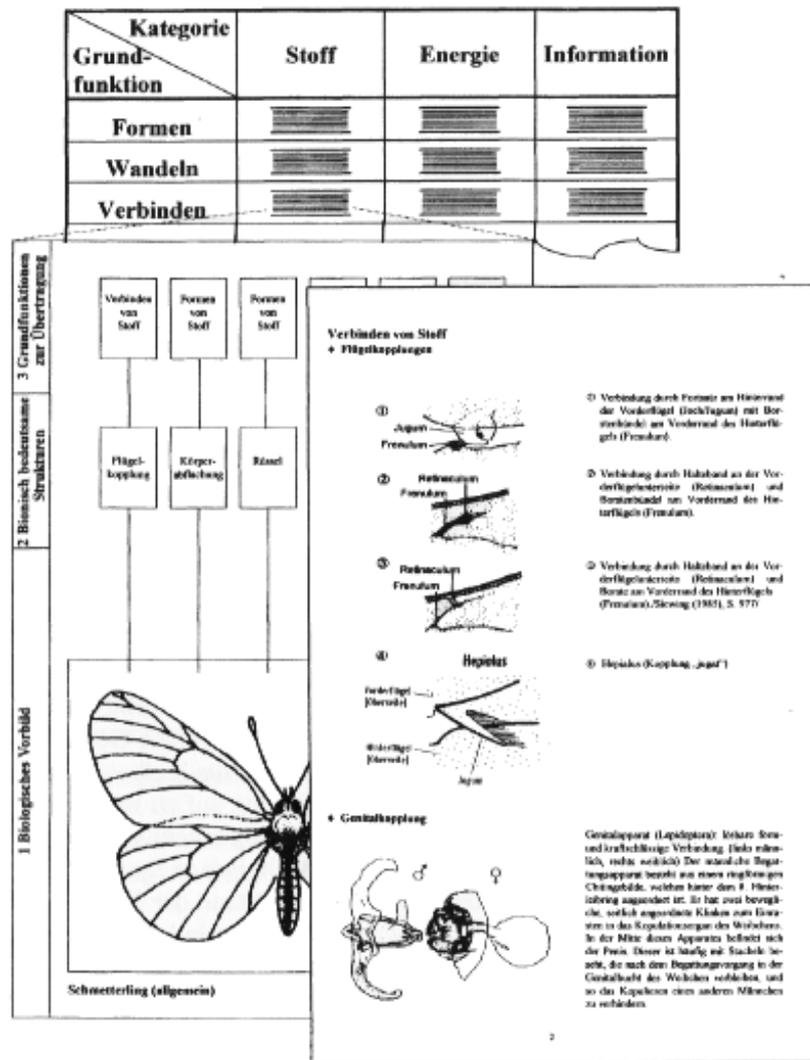


Bild 6.3: Katalog biologischer Konstruktionen nach HILL [Hil98a, S. 3]

Den Katalog biologischer Funktions- und Strukturprinzipien sieht HILL als Werkzeug zur Unterstützung der Lösungsfindung im Rahmen der „Naturorientierten Innovationsstrategie“<sup>3</sup>. Bislang war der Lösungskatalog stets Bestandteil von Publikationen zu diesem Thema [Hil98a; Hil98b; Hil99]. HILL stellt in diesen Publikationen den Aufbau des Katalogs exemplarisch anhand ausgewählter Beispiele dar. Es ist einsehbar, dass der Katalog in dieser Form für die Lösungsfindung im Produktentwicklungsprozess nur bedingt geeignet ist. Wünschenswert wäre eine „eigenständige“ Veröffentlichung; eine solche Publikation steht aber bis dato noch aus.

Einen anderen Weg zum Aufbau bionischer Konstruktionskataloge schlägt NACHTIGALL vor. Sein „systematischer Katalog zum bionischen Gestalten“ [Nac05] ist ein dreiteiliges Werk. Der erste Teil

3 Die „Naturorientierte Innovationsstrategie“ stellt einen Denk- und Handlungsprozess zur systematischen und zielgerichteten Zielbestimmung und Lösungsfindung dar [Hil99, S. 87]. Wesentlicher Bestandteil des Prozesses ist dabei die Zielbestimmung. Bei der Festlegung der Entwicklungsziele spielen *Evolutionstrends* eine entscheidende Rolle. Die Trends gelten sowohl für Evolution in der Natur als auch für die Technik-Evolution. Sie können als Gesetzmäßigkeiten formuliert und so zur Zielbestimmung genutzt werden (vgl. Kapitel 3.4).

enthält eine Sammlung von Zeichnungen und Texten, in der wichtige Elemente und Systeme der belebten Natur vorgestellt werden. Die Sammlung ist nicht wie bei HILL nach Grundfunktionen, sondern thematisch geordnet. Bei der Themenwahl orientiert sich NACHTIGALL daran, „*was den Designer oder Konstrukteur besonders interessieren könnte*“ [Nac05, S. VI]. Er wählt 15 Hauptkategorien, die er in weitere Unterkategorien gliedert. So finden sich z. B. unter der Hauptkategorie „Verbindungen und Verankerungen“ die Rubriken:

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkopplungen</li> <li>• Spreiz- und Verankerungsmechanismen</li> <li>• Saugeinrichtungen</li> <li>• Adhäsion</li> <li>• Biologische Mikro-Tribologie</li> <li>• Schlüssel-Schloss-Prinzip</li> <li>• Kupplung und Andock-Mechanismen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwurzeln</li> <li>• Verweben</li> <li>• Druckköpfe und „Reißverschlüsse“</li> <li>• Klemmen</li> <li>• Scheren</li> <li>• Falzen</li> <li>• Reinigen</li> </ul> |
|---|--|

Für jede Rubrik wird anhand von ausgewählten Beispielen erläutert, wie die Natur diese Problemstellungen löst. NACHTIGALL nutzt zur Beschreibung im Wesentlichen Fließtext und ergänzt ihn durch zahlreiche Skizzen und Abbildungen. Im Text sind häufig Vergleiche zu Sachverhalten zu finden, die dem Leser aus dem Alltag bekannt sind. Darüber hinaus verweist NACHTIGALL zum Teil auf technische Konstruktionen, bei denen ähnliche Lösungsprinzipien bereits Verwendung finden und greift zur Beschreibung auf typisch technische Begriffe wie z. B. „Kraftschluss“ zurück. Auf diese Weise wird auch einem weniger in der Biologie bewanderten Leser der Sachverhalt verständlich.

Der zweite und dritte Teil des Katalogs enthält jeweils eine Fotosammlung, die durch kurze Texte erläutert wird. Während der zweite Teil Fotos der belebten „Makro-Welt“ umfasst, beinhaltet der dritte Teil rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. Die Fotos ordnet NACHTIGALL analog zum ersten Teil nach funktionellen Gesichtspunkten. Sie sollen dem Produktentwickler im Wesentlichen als Inspirationsquelle dienen. NACHTIGALL verzichtet in seinem Katalog bewusst auf Hinweise, wie eine biologische Lösung in eine technische umgesetzt werden kann. Er argumentiert, dass solche Darstellungen zum einen immer nur beispielhaft wären und zum anderen nicht mit dem schöpferischen Eigengestalten des Produktentwicklers harmonieren würden [Nac05, S. V].

Aus konstruktionsmethodischer Sicht stellt die Verwendung von Katalogsystemen zur Unterstützung der Lösungssuche, wie sie von NACHTIGALL und HILL postuliert werden, kein Neuland dar. Im Schrifttum der Produktentwicklung wurde diese Möglichkeit zur Unterstützung bereits früher intensiv diskutiert. Bedeutung haben hier vor allem die Konstruktionskataloge von ROTH [Rot94] erlangt.

Diese Kataloge sollen im Folgenden kurz vorgestellt und mit den Ansätzen von HILL und NACHTIGALL verglichen werden.

Die Konstruktionskataloge von ROTH berücksichtigen in erster Linie solche Prinzipien, die bereits in technischen Systemen genutzt werden. Sie bestehen aus einem Gliederungs-, einem Haupt- und einem Zugriffsteil. Zusätzlich sind sie oft mit einem Anhang versehen, der Platz für ergänzende Bemerkungen bietet. Die Suche im Katalog erfolgt über seinen Gliederungsteil. Dieser muss daher, wie ROTH schreibt, einer gewissen Systematik folgen, vollständig und skalierbar sein. Die Forderung nach Vollständigkeit ist bei einem Katalog nur deshalb möglich, weil „*das Abstraktionsniveau für alle Objekte oder Lösungen gleich und daher ihre Begrenzung auf eine überschaubare, annähernd vollständige Anzahl auch möglich*“ [Rot95, S. 5] ist. Sollte es dennoch notwendig werden, neue Objekte in den Katalog mit aufzunehmen, können diese in der Gliederung an entsprechender Position „eingehängt“ werden.

Der Gliederungsteil in den Konstruktionskatalogen besteht aus drei Spalten. Die erste Spalte beinhaltet die „Systemklasse“. ROTH übernimmt hier die aus der Systemtheorie bekannte Klassifikation, wonach Energie gespeichert, übertragen und verknüpft werden kann [Rot95, S. 8]. In der zweiten Spalte beschreibt er den wirkenden Effekt. Dabei geht ROTH davon aus, dass die Effekte alle bekannt sind und jeweils nur ein Effekt wirkt. In der dritten Spalte dienen geometrische und qualitative Gesichtspunkte zur weiteren Differenzierung. So lässt sich z. B. unterscheiden, ob die Richtungen der wirkenden Kräfte sich schneiden, parallel oder senkrecht zueinander verlaufen.

Ein Vergleich der Kataloge von NACHTIGALL, HILL und ROTH macht Gemeinsamkeiten und Unterschiede deutlich. Jeder der genannten Ansätze hat zum Ziel, dem Produktentwickler Informationen zur Unterstützung der Lösungsfindung bereitzustellen. Neben den Inhalten unterscheiden sich die Kataloge vor allem in der Strategie, mit der dieses Ziel erreicht werden soll. So stellen die Konstruktionskataloge von ROTH dem Produktentwickler ein umfassendes Reservoir an Lösungsprinzipien bereit. Die Systematik des Gliederungsteils beschleunigt die Suche, und die gefundenen Prinzipien können aufgrund des Abstraktionsgrades ohne weitere Interpretation übernommen werden.

Völlig anders gestaltet sich das Arbeiten mit dem Katalog von NACHTIGALL. Dem Produktentwickler werden hier biologische Strukturen präsentiert, die bestimmte Funktionen erfüllen. Die Fülle an biologischen Strukturen macht den Aufbau eines *vollständigen* Katalogs unmöglich. NACHTIGALL konzentriert sich daher auf die Darstellung einiger ausgewählter Beispiele, von denen er meint, sie seien für den Produktentwickler interessant. Seine Sammlung weicht vom „typischen“ Aufbau eines Katalogs ab. Der Fließtext im ersten Teil erschwert die schnelle Suche nach bestimmten Informationen, und der Leser ist zum Teil gezwungen, zwischen den Zeilen zu lesen<sup>4</sup>. Während ROTH dem Produkt-

<sup>4</sup> Dies ist NACHTIGALL durchaus bewusst, da er schreibt: „*Biologisches Design also wird* ... Weiter auf Seite 126

entwickler mit seinem tabellenartigen Katalog Prinzipien offeriert, die „nur noch“ ausgearbeitet und dann genutzt werden können, ist es bei den Katalogen von NACHTIGALL die Aufgabe des Ingenieurs, aus den dargestellten Beispielen die zugrunde liegenden Prinzipien zu ermitteln und zu prüfen, inwiefern das Prinzip und die Struktur des biologischen Systems auf die technische Problemstellung übertragbar sind. Der Katalog von NACHTIGALL ist daher weniger ein Hilfsmittel für die Lösungssuche; er dient vielmehr der Unterstützung der Ideenfindung, indem er dem Produktentwickler in vielerlei Hinsicht *Anregungen* für die Gestaltung von Produkten gibt.

Einen Mittelweg stellt der Ansatz von HILL dar. Durch die „technischen Aufbereitung“ der Beispiele in seinem Katalog versucht er einerseits dem Produktentwickler den Zugang zur „Welt der biologischen Systeme“ zu erleichtern, andererseits bietet die Methodik der Naturorientierten Innovationsstrategie dem Produktentwickler genügend kreativen Freiraum für die Produktgestaltung und die technische Umsetzung. Darüber hinaus ist die von HILL gewählte Ordnung nach Grundfunktionen und den Elementen Energie, Stoff und Information dem Produktentwickler aus der Konstruktionsmethodik bekannt. Zwar stellt GRAMANN fest, dass die von HILL gewählte Funktionsaufteilung in der Konstruktionsmethodik inzwischen als überholt gilt, weil sie sehr abstrakt ist und nur selten der Ausdrucksweise des Anwenders entspricht [Gra04, S. 110 f.], jedoch ist anzumerken, dass eine Systematik, die auf einer begrenzten Anzahl definierter Begriffe basiert, im Hinblick auf eine Katalogisierung nachvollziehbar und sinnvoll ist.

Generell kann jedoch festgestellt werden, dass das Arbeiten mit den Katalogen biologischer Konstruktionen nicht einer „typischen Katalogauswahl“ entspricht. In den Veröffentlichungen zur Bionik wird immer wieder der Anregungscharakter biologischer Systeme betont. Oft ist zu lesen, dass bereits die Beschäftigung mit biologischen Systemen den Produktentwickler auf neue Ideen bringen kann und ihn zu Lösungsansätzen führt, die er bislang nicht betrachtet hat. Vor diesem Hintergrund ist der Aufbau der Kataloge biologischer Konstruktionen mit Sicherheit zielführend. Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass die Lösungen der Natur sich nicht ohne Weiteres in die Welt der Technik übertragen lassen. Es kommt darauf an, die zugrunde liegenden Prinzipien zu ermitteln und ihre Übertragbarkeit zu prüfen. Dass die biologischen Systeme hierzu *vollständig* verstanden sein müssen, ist einsehbar. Für viele biologische Systeme weiß man im Groben, wie sie funktionieren. Schaut man jedoch ins Detail, so ist in der Regel festzustellen, dass es sehr viele Wissenslücken gibt, die für eine technische Umsetzung relevant sind<sup>5</sup>. Es bedarf dann weiterer Grundlagenforschung, um die offenen Fragen zu klären (vgl. Kapitel 2.3).

---

*ausführlich und wohl gegliedert beschrieben, sozusagen für die Weiterführung vorbereitet. Ideen zur bionischen Umsetzung stehen allerdings nur zwischen den Zeilen“ [Nac05, S. V].*

<sup>5</sup> Nach einer Aussage von Frau Dr. ROTH-NEBELSICK im telefonischen Interview am 18.04.2006.

Die Nutzung der Kataloge biologischer Konstruktionen in der Produktentwicklung ist auch aus einem zweiten Grund eingeschränkt: Die Kataloge nutzen Funktionen als Ordnungskriterium. Dieser Ansatz ist legitim. Er hat jedoch Konsequenzen für das bionische Arbeiten. Die Definition der Funktionen eines technischen Systems gehört zu den ersten Schritten der konstruktionsmethodischen Herangehensweise (vgl. Bild 3.1, S. 33). Die Funktionen basieren auf der Aufgabenstellung, in der die grundlegenden Randbedingungen und Zielstellungen festgelegt werden. Werden hier aber z. B. Forderungen nach einer langen Haltbarkeit und definierten Systemzuständen gestellt, so führt dies zu typisch technischen Funktionen. Ein Bauteil, das lange halten soll, wird in der Regel so dimensioniert, dass es allen Belastungen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten werden, standhält. Seine Funktionserfüllung ist an definierte Randbedingungen gekoppelt. Weichen diese vom vordefinierten Zustand ab, ist nicht gewährleistet, dass das Bauteil die ihm zugeordnete Funktion erfüllt.

Anforderungen, wie sie von Seiten der Technik oft gestellt werden, sind eher untypisch für die Lösungen der Natur (vgl. Kapitel 6.2.4). Die Lebensdauer biologischer Systeme ist beschränkt. Ihre Systemzustände sind nicht fest definiert, sondern flexibel und anpassbar. Lange Haltbarkeit wird ersetzt durch Fähigkeit zur Erneuerung und vordefiniertes Systemverhalten durch Selbstanpassung. Natur und Technik unterscheiden sich in den Randbedingungen und in den Möglichkeiten, die ihnen zur Verfügung hervorzubringen. Dies kommt nicht nur in unterschiedlichen Strukturen und Wirkprinzipien zum Ausdruck, sondern eben auch in den Funktionen, die in Natur und Technik zu finden sind.

Des Weiteren hängt die Ausgestaltung einer technischen Lösung wesentlich davon ab, auf welcher Systemebene die einzelnen Funktionen erfüllt werden sollen. Der Produktentwickler muss entscheiden, ob eine Funktionsintegration in einem Bauteil sinnvoll ist oder ob die Funktionen besser durch verschiedene Bauteile realisiert werden sollten. Die Entwicklung von Produkten muss daher aus einer mehrperspektivischer Sicht erfolgen. In diesem Beziehungsnetzwerk sind die Funktionen durchaus als Variablen zu betrachten, die sich anderen Anforderungen unterordnen können. Diese Tatsache ist zu berücksichtigen, wenn Funktionen als Suchkriterium in einem Katalog verwendet werden sollen. Vor diesem Hintergrund erscheint es nicht sinnvoll, Funktionen als einzige Brücke für eine Analogiebildung zu sehen. Es kann u. U. hilfreich sein, unter Vorgabe der Randbedingungen nach Funktionen zu suchen. Ein Katalog biologischer Konstruktionen, der allein auf die Suche nach Funktionen abstellt, „verschenkt“ hier Anregungspotential. Viele für die technische Problemstellung relevante biologische Lösungen können nicht gefunden werden, da mit den Funktionen auch der Lösungsraum festgelegt wird.

## 6.2.2 Digitaler Katalog biologischer Konstruktionen

SCHILLING ET AL. [SKH+06; SKW06] schlagen vor, den Katalog biologischer Konstruktionen in eine digitale Form zu bringen und so die Nutzbarkeit im Rahmen der Produktentwicklung zu verbessern<sup>6</sup>. Sie stellen das Konzept eines „Analogie-Suchers“ vor. Dabei handelt es sich um ein „internetbasiertes, einfaches Content-Management-System (CMS)“ [SKH+06, S. 2]. Das System verknüpft funktionsanaloge Strukturen in Biologie und Technik. Es nutzt als Ordnungssystematik die Grundfunktionen nach HILL. Der Nutzer kann auf der Startseite bestimmte Symbolfelder (z. B. „Stoff verbinden“) anklicken und erreicht so die hinterlegten Seiten. Die Seiten selbst sind untereinander verlinkt, so dass der Benutzer zwischen der Beschreibung der technischen Module, den Grundfunktionen, den biologischen Systemen mit analogen Grundfunktionen und den Beispielen für technische Umsetzung wechseln kann. Das System existiert als Funktionsprototyp. Es wird gegenwärtig von Studenten des Fachgebietes Biomechatronik an der TU Ilmenau mit Daten gefüllt.

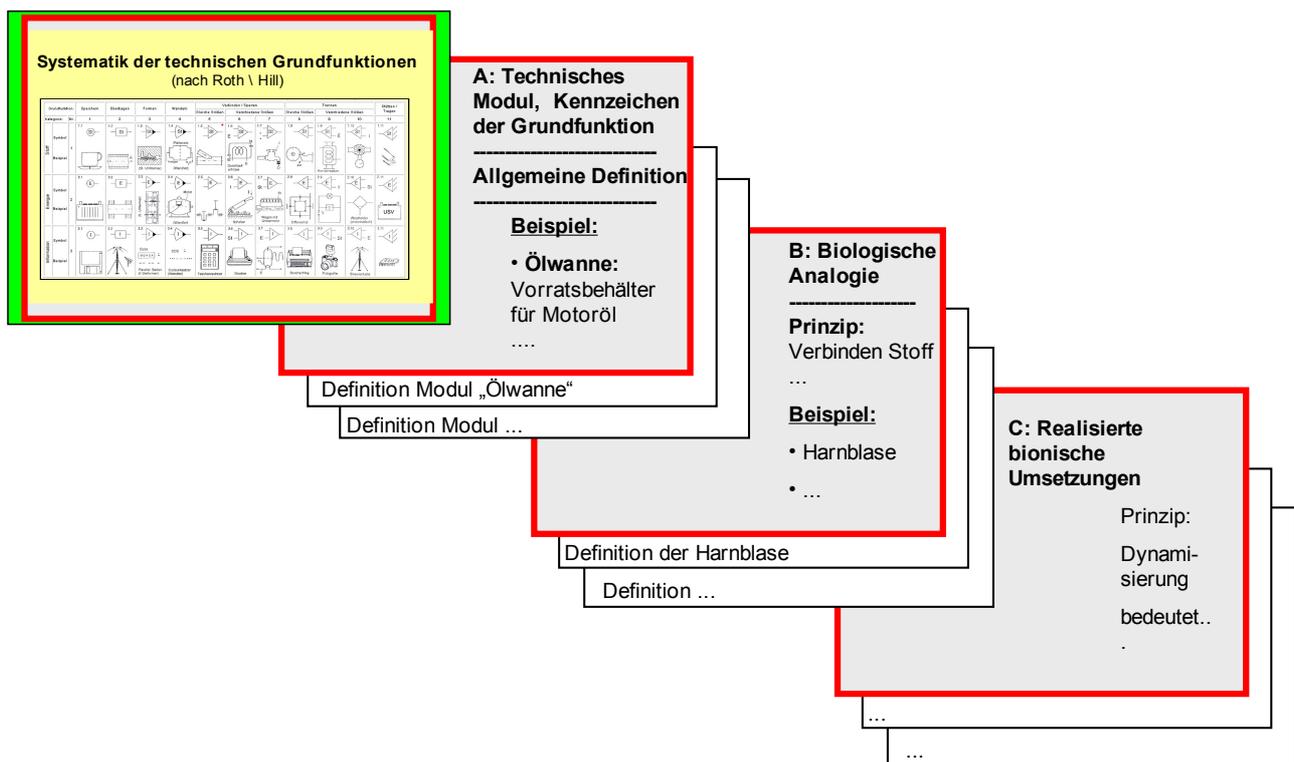


Bild 6.4: Abfolge der hinterlegten Seiten im "Analogie-Sucher" [Sch06b]

Der von SCHILLING ET AL. beschriebene Ansatz scheint prinzipiell als Werkzeug zur Unterstützung der Lösungsfindung geeignet. Das System vereinfacht die Recherche nach bionisch relevanten Strukturen und trägt so dazu bei, dass Assoziationen zu biologischen Systemen so weniger sporadisch erfolgen. Leider ist das System bislang nicht öffentlich verfügbar. Zudem existieren bislang keine Publikationen, die das System detailliert beschreiben.

<sup>6</sup> Die Darstellungen an dieser Stelle stützen sich auf Informationen aus persönlichen Gesprächen mit den genannten Autoren und auf unveröffentlichte Manuskripte [Sch06b; SKH+06]. Andere Quellen existieren hierzu bislang nicht.

### 6.2.3 Assoziationslisten

GRAMANN kommt zu dem Schluss, dass Konstruktionskataloge in der Konstruktionsforschung zwar sehr populäre Werkzeuge sind, auf der anderen Seite aber in der Praxis kaum zur Informationsbeschaffung genutzt werden [Gra04, S. 56 ff.]. Er sieht hierfür verschiedene Ursachen. So führt GRAMANN z. B. an, dass viele der Kataloge eine abschreckende Wirkung auf potentielle Anwender haben, weil sie zum Teil sprachlich unnötig „verkompliziert“ sind. Darüber hinaus sind Konstruktionskataloge zu statisch. Sie liegen heute – trotz der Möglichkeiten, die IT-Systeme bieten – in der Regel in Papierform vor und lassen sich deshalb nicht individuell erweitern und auch nicht durch spezifische Suchabfragen situationsgerecht ergänzen.

Eine Katalogisierung der Lösungen der Natur im Sinn der Konstruktionskataloge hält GRAMANN für ungeeignet [Gra04, S. 109]. Prinzipiell scheint die Nutzung einer Datenbank ein sinnvoller Ansatz zu sein, doch er weist darauf hin, dass es aufgrund der Diversifikation der Natur ein utopisches Ziel ist, die Informationsfülle über eine Datenbank handhaben und aktuell halten zu wollen. Zudem liegt das Wissen bereits in Form von Fachliteratur vor. Was dem Produktentwickler nach Ansicht von GRAMANN lediglich fehlt, ist der Zugang zu den Daten. Mit der *Assoziationsliste* (Bild 6.5) stellt er ein Werkzeug vor, das dem Produktentwickler den Zugang zum Informationspool biologischer Systeme erleichtert [Gra04, S. 109 ff.].

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
erzeugen/ synthetisieren	erzeugen	Plasma	
		Poröse Stoffe	Knochenwachstum, Schaum von Zikaden (Auchenorrhyncha) und Schnecken (Gastropoda), Kieselalgen (Diatomeen), Schwämme (Porifera), Schwammparenchym von Laubblättern
		Feststoffe	Sekretion, Zellteilung
		strukturierte Stoffe	Sekretion, Zellteilung
		technische Objekte und Stoffe	siehe Biochemie
		thermische Energie	Stoffwechsel, Muskelzittern, Bombardierkäfer (Brachynus)
		chemische Verbindungen	Biochemische Reaktionen (Synthese)
Aggregatzustand ändern	sublimieren	Feststoffe	
	verdampfen	Flüssigkeiten	Schwitzen (passiv), Schwammparenchym von Laubblättern (passiv), Bombardierkäfer (Brachynus) (aktiv)
	kondensieren	Gas	Nasengänge, wüstenbewohnende Pflanzen und Tiere, Pflanzenblatt
	schmelzen	Feststoffe	Walrat des Pottwals (Physeter macrocephalus)
	trocknen	Feststoffe	Gefiederspreizen (z.B. Kormoran (Phalacrocorax carbo)), Wasserentzug im Darm, Fellschütteln, Hydrophobierung durch Lipide, osmotisches Potenzial, Pflanzensamen
bewegen	vibrieren	Feststoffe	Ein- auskoppelbarer Flügelschlag der Insekten (Insecta)
	rotieren	Feststoffe	Geißelschlag (Cilien)

Bild 6.5: Auszug aus der Assoziationsliste von GRAMANN [Gra04, S. 140]

Die Zuordnung von biologischem System und der technischen Problemstellung erfolgt anhand der (Soll-)Funktion des zu entwickelnden technischen Systems. Darüber hinaus hält GRAMANN einen Zugang über das bionisches Vorgehensmodell (vgl. Kapitel 5.1.4) und die dort ermittelten Randbedingungen des technischen Problems für sinnvoll. Er verweist aber darauf, dass dieser Zugang wegen der großen Anzahl unterschiedlicher Parameter und ihrer Kombinationen im Rahmen einer freien Assoziationsbildung erfolgen muss.

Die Ordnungssystematik der Assoziationsliste wurde aus einem Softwaretool zur Unterstützung der Methodik TRIZ (vgl. Kapitel 6.2.6) abgeleitet. GRAMANN vereinfacht und modifiziert die Systematik, um sie als eine statische Liste in Papierform nutzen zu können. So hebt er die Trennung von Funktion, Feld, Objekt und Parameter auf und fügt eine zweite Strukturebene hinzu, die einen effizienteren Zugang zu den Funktionen ermöglichen soll.

Ziel der Assoziationsliste ist es, den Produktentwickler über die Funktionen zu Begriffen und Bezeichnungen von biologischen Systemen zu leiten. Mit diesen Begriffen wird der Produktentwickler in die Lage versetzt, Stichwortsuchen in der Fachliteratur und im Internet durchzuführen. GRAMANN weist darauf hin, dass sich die Anzahl der relevanten Suchergebnisse deutlich erhöhen lässt, wenn an Stelle der „Trivialbezeichnung“ die wissenschaftlichen Bezeichnung des assoziierten Systems für die Suche verwendet wird [Gra04, S. 111].

Der Ansatz von GRAMANN scheint ein gangbarer Weg zu sein. Mit Hilfe der Assoziationsliste erhält der Produktentwickler schnell Hinweise auf biologische Systeme, die für die Problemstellung relevant sein könnten. Für weiterführende Informationen muss er jedoch mit Hilfe der gefundenen Stichworte eine Recherche in der Fachliteratur durchführen. Hierbei ist nicht gewährleistet, dass er die in der Literatur aufgeführten Sachverhalte problemlos verstehen und verwerten kann, sind sie doch in einer fachspezifischen Sprache niedergeschrieben und richten sich zudem an einen anderen Nutzerkreis (vgl. Kapitel 5.3.4). Die Assoziationsliste lässt sich problemlos erweitern. Sie verliert jedoch an Übersichtlichkeit, wenn die Anzahl der Assoziationen steigt. Zwar ließen sich in einer rechnerunterstützten Lösung Filter- und Suchmöglichkeiten implementieren, doch eine Umsetzung in ein Softwarewerkzeug wird von GRAMANN nicht diskutiert.

## 6.2.4 Grundprinzipien biologischer Systeme

Die oben vorgestellten Kataloge biologischer Konstruktionen können ebenso wie die Assoziationslisten zur Anregung auf „Funktionsebene“ dienen. Der Produktentwickler sucht sich dabei die Funktion, die er realisieren möchte, aus dem Katalog bzw. aus der Liste heraus und lässt sich durch die gefundenen biologischen Strukturen und Lösungen inspirieren. Die Nutzung von Funktionen ist zwar einerseits mit einer Abstraktion der angestrebten Lösung verbunden, sie führt jedoch andererseits zu

relativ konkreten Anregungen in Form von biologischen Systemen. Hieraus ergibt sich oft das Problem, dass die gewonnenen Erkenntnisse nicht zur Lösung der technischen Aufgabenstellung genutzt werden können, weil die Randbedingungen in Natur und Technik zu unterschiedlich sind oder weil eine technische Umsetzung zu aufwändig wäre. In diesen Fällen wäre es für den Produktentwickler sinnvoller, sich von der Natur inspirieren zu lassen, *ohne* auf die konkreten Lösungen (die Pflanzen und Tiere) schauen zu müssen.

In der Tat ist diese Form der Anregung im Schrifttum der Bionik zu finden. So nennt NACHTIGALL „10 Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen“ [Nac98b], die der Produktentwickler bei der Gestaltung von Produkten beherzigen sollte. Bei MOSBRUGGER & ROTH sind die „Prinzipien der Evolution“ [MR98] aufgeführt und KÜPPERS & TRIBUTSCH [KT02, S. 176 ff.] kennzeichnen mit Verweis auf VESTER [Ves91] die „Biokybernetische Grundregeln“ als wesentlich. Ähnliche Aufzählungen sind auch an anderer Stelle [Hil98a; PB02] zu finden. Im Bild 6.6 sind einige der im Schrifttum genannten Grundprinzipien zusammengestellt. Es handelt sich dabei um eine auszugsweise Darstellung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Eine Schwierigkeit bei der Zusammenstellung ist es, dass die Publikationen thematisch recht unterschiedlich gelagert sind und die Grundprinzipien oft nur am Rande erwähnt werden. Zudem prägt das Schwerpunktthema der jeweiligen Publikationen die Darstellung der Prinzipien. Dadurch existiert im Schrifttum inzwischen eine Vielzahl von Sammlungen bionischer Grundprinzipien, die teilweise identisch sind, zum Teil aber auch deutlich voneinander abweichen.

Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen	Grundprinzipien der Evolution	Biokybernetische Grundregeln
Integrierte statt additiver Konstruktion	Modularität	Negative Rückkopplung
Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelelements	Opportunismus/Funktionswandel	Funktionsunabhängigkeit von quantitativen Wachstum
Multifunktionalität statt Monofunktionalität	Zukunftsblindheit	Funktionsunabhängigkeit vom Produkt
Feinabstimmung gegenüber der Umwelt	Spezialisierung/Arbeitsteilung	Das Jui-Jitsu-Prinzip
Energieeinsparung statt Energieverschleuderung	Multifunktionalität/Optimumkompromisse	Mehrfachnutzung
Direkte und indirekte Nutzung der Sonnenenergie	Dynamik	Wiederverwertung
Zeitliche Limitierung statt unnötiger Haltbarkeit	Selbstorganisation/Selbstanpassung	Symbiose
Totale Recyclierung statt Abfallanhäufung	Sterben/Aussterben	Prinzipielle Befolgung eines biologischen Grunddesigns
Vernetzung statt Linearität		
Entwicklung im Versuch-Irrtums-Prozess		

Bild 6.6: Auswahl von Grundprinzipien biologischer Systeme [Nac98b; MR98; KT02]

So unterschiedlich die Darstellung der Prinzipien auch sein mögen, es lässt sich feststellen, dass sie sich alle durch eine systemische und energetische Sichtweise auszeichnen. Der Produktentwickler wird direkt oder indirekt aufgefordert, für die technische Lösung vorrangig solche Ressourcen an Material, Energie und Information zu nutzen, die ohnehin zur Verfügung stehen und bei der Konzeption das Umfeld der Lösung und dessen zukünftige Entwicklung mit zu berücksichtigen. Insgesamt zielen die Prinzipien darauf ab, den Nutzen einer Lösung zu maximieren und gleichzeitig den Aufwand, der hierzu aufgebracht werden muss, zu minimieren.

Durch die Verallgemeinerung wird deutlich, dass die bionischen Grundprinzipien aus Sicht der Produktentwicklung nur wenig neue Erkenntnisse beinhalten. Ein Produktentwickler ist ohnehin bestrebt (oder sollte dies zumindest sein), Produkte unter obengenannten Gesichtspunkten zu entwickeln. Zudem existieren seitens der Produktentwicklungsmethodik eine Reihe von Konstruktionsprinzipien [Kes54; Suh90; PB93], mit denen die Entwicklungsrichtung eines Produktes in ähnlicher Weise beeinflusst werden soll (Bild 6.7).

Gestaltungsprinzipien	Gestaltungsprinzipien	Allgemeine Konstruktionsprinzipien
Prinzip der minimalen Herstellungskosten (Sparbau)	Prinzip der Aufgabenteilung	Einfach, eindeutig, sicher
Prinzip vom minimalen Raumbedarf	Prinzip der fehlerarmen Gestaltung	Minimaler Informationsgehalt
Prinzip vom minimalen Gewicht (Leichtbau)	Prinzip der Kraftleitung	
Prinzip von den minimalen Verlusten	Prinzip der Selbsthilfe	
Prinzip von der günstigsten Handhabung	Prinzip der Stabilität und Bistabilität	

Bild 6.7: Zusammenstellung ausgewählter Konstruktionsprinzipien [Kes54; Suh90; PB93]

Die Sinnhaftigkeit sowohl der bionischen Grundprinzipien wie auch der Prinzipien der Konstruktionsmethodik ist unbestritten. Die Schwierigkeit scheint allein in der Umsetzung zu liegen. An einem Beispiel soll dies verdeutlicht werden. NACHTIGALL nennt als ein Grundprinzip „*Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelements*“ [Nac98b, S. 296]. Dieses Prinzip geht zwar konform mit den Zielen der Produktentwicklung, doch die Realisierung scheitert an den momentan verfügbaren technischen Möglichkeiten. Mathematisch stellt eine Optimierung das Auffinden eines Minimums oder eines Maximums einer Zielfunktion dar. Will man in der Produktentwicklung etwas optimieren, muss eine Zielfunktion definiert werden. Der Produktentwickler muss folglich wissen, was optimal ist. In der Natur legen die Umstände die Zielfunktion fest. Die Bewertung des „Ganzen“ erfolgt „im realen Leben“. Der Produktentwickler hingegen will die technische Lösung bewerten, bevor sie auf den Markt kommt und sich dort bewähren muss. „Optimierung des Ganzen“ heißt für die Produktentwicklung somit nicht nur die technische Gesamtlösung zu modellieren, sondern auch das Umfeld der Lösung mit all ihren Randbedingungen und Einflüssen mit einzubeziehen und „eine Ziel-

funktion des Marktes“ zu beschreiben. Es ist einsehbar, dass ein solcher Ansatz wegen der Komplexität des Gesamtsystems zum Scheitern verurteilt ist. Dem Produktentwickler verbleibt es daher nur, im Rahmen seiner Möglichkeiten zu agieren und zumindest für die einzelnen Elemente der Lösung das Optimum anzustreben.

Bei den bionischen Grundprinzipien und den Konstruktionsprinzipien handelt es sich im Wesentlichen um Richtlinien, die dem Produktentwickler als Denkanstöße dienen können. Ob eine technische Lösung gemäß den Prinzipien entwickelt wurde, lässt sich nur subjektiv im Kontext der Aufgabenstellung und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen bewerten.

### **6.2.5 Gesetzmäßigkeiten und allgemeingültige Regeln**

Biologische Konstruktionskataloge und Assoziationslisten zielen wie bereits erwähnt darauf ab, den Produktentwickler anhand von Beispielen zu Lösungen für seine Problemstellung zu führen. Er muss dazu die gefundenen biologischen Lösungen interpretieren und die für seine Problemstellung relevanten Sachverhalte ableiten. Mit den Grundprinzipien als übergeordnete Konstruktionsprinzipien steht dem Produktentwickler andererseits ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem er auf relativ abstrakter Ebene die Entwicklungsziele formulieren und die optimale technische Lösung beschreiben kann. Die konkrete Umsetzung ist jedoch mit Randbedingungen verknüpft, die den Produktentwickler zu Kompromissen zwingen. Vereinfacht lässt sich feststellen, dass der Wissenstransfer mit den biologischen Konstruktionskatalogen auf einer relativ konkreten Ebenen erfolgt, während das Wissen mit den Grundprinzipien auf abstrakter Ebene bereitgestellt wird. Einen Mittelweg stellt die Vermittlung von Gesetzmäßigkeiten und Regeln dar, die sowohl für die Wissensdomäne Biologie als auch für die der Technik gelten. Im Folgenden soll dieser Ansatz diskutiert werden.

Natur und Technik unterscheiden sich, wie bereits mehrfach herausgestellt wurde, in vielen Dingen. Dennoch ist festzustellen, dass in beiden Welten die Gesetzmäßigkeiten der Physik gelten. Es liegt daher nahe, diese Gesetzmäßigkeiten als Grundlage für die Wissensübertragung zu nutzen. Andererseits lässt sich argumentieren, dass die Gesetze der Physik hinlänglich bekannt sind und schon immer sowohl die Grundlage und als auch den Rahmen für die Entwicklung technischer Produkte bildeten. Wie also soll eine Wissensübertragung auf der Grundlage physikalischer Gesetze zu neuen Erkenntnissen und zur Verbesserung von technischen Lösungen führen? In der Tat scheint es so, dass der Produktentwickler nicht von physikalischen Gesetzen direkt lernt, sondern vielmehr von Lösungen, bei denen die Gesetzmäßigkeiten in einem neuen Kontext und in bislang nicht genutzten Kombinationen auftreten. Der Lotus-Effekt [BN98] ist hierfür ein gutes Beispiel (vgl. Kapitel 2.2.1). So war bekannt, dass Wachse wasserabweisende Schichten bilden. Andererseits ist es auch nichts Neues, dass sich durch eine Strukturierung der Oberfläche die Kontaktfläche verkleinern lässt und so

die wirkenden Adhäsionskräfte reduzieren werden können. In der Lotusblume werden beide Effekte kombiniert. Sie verstärken sich gegenseitig und führen letztlich zum Effekt der Selbstreinigung.

Mit Hilfe der Gesetze der Physik gelingt es, komplexe Sachverhalte durch Formel auszudrücken. Da die Formeln über die physikalischen Größen miteinander verknüpft sind, lassen sie sich voneinander ableiten. So können z. B. aus dem Energieerhaltungssatz verschiedene Arten der mechanischen Arbeit (Hubarbeit, Reibungsarbeit, Spannarbeit und Beschleunigungsarbeit) hergeleitet werden. Für jeden dieser Sachverhalte gelten unterschiedliche Berechnungsformeln, die im Kern aber Ähnliches (den Energieerhaltungssatz) aussagen.

Für die Produktentwicklung kann es sinnvoll sein, die Gesetzmäßigkeiten in einer bildhafter Sprache zu formulieren. Auf diese Weise ließen sie sich besser einprägen und gingen dem Produktentwickler in „Fleisch und Blut“ über. Für das obengenannte Beispiel der Arten mechanischer Arbeit existiert eine solche Formulierung. Sie ist bekannt als die *Goldene Regel der Mechanik* und lautet: „Was man an Kraft spart, muss man an Weg zulegen“. Die Aussage ist bildhaft und „formelfrei“. Sie gilt für jede Art von mechanischer Arbeit, da diese bekanntermaßen als das Wegintegral der Kraft definiert ist.

Weitere Beispiele solcher bildhaft dargestellten Regeln sind bei MATTHECK [FZK04] zu finden. Mit der Regel „in Seilen denken“ und dem Prinzip des „verrammelten Notausganges“ gibt er dem Produktentwickler Handlungshilfen an die Hand, die dieser im Konstruktionsalltag nutzen kann. MATTHECK leitete diese Konstruktionsrichtlinien aus natürlichen Strukturen ab. Er untersuchte die Mechanik bei Bäumen und fand heraus, dass diese „Meister der Mechanik“ sind. So bilden manche Bäume auf der zugbelasteten Seite Brettwurzeln aus [Mat97, S. 252 f.]. Strukturen, die auf Zug ausgelegt sind, können in der Regel materialärmer ausgeführt werden, als solche, die einer Druckbelastung standhalten müssen<sup>7</sup>. Grund hierfür ist die Tatsache, dass Druckstützen auch gegen Knicken ausgelegt werden müssen. Im Hinblick auf den Leichtbau ist also eine Zugkonstruktion einer Druckkonstruktion zu bevorzugen. MATTHECK weist darauf hin, dass in diesem Zusammenhang ein „Denken in Seilen“ hilfreich sein kann. Seile können nur auf Zug belastet werden. Versucht der Konstrukteur sein Produkt als Seilkonstruktion zu sehen, wird er von vornherein eine Leichtbaustruktur entwickeln.

Bei knickgefährdeten Strukturen lässt sich in der Natur häufig das Prinzip des „verrammelten Notausganges“ [FZK04] finden. Dabei wird die Druckstütze vorgekrümmt und so eine Knickrichtung vorgegeben. Eine auf Zug belastete Struktur verhindert dann, dass die Stütze tatsächlich in Richtung dieses „Notausganges“ wegnickt.

---

<sup>7</sup> Die Zug- und Druckfestigkeiten sind materialabhängige Größen. So entspricht z. B. die Zugfestigkeit von Grauguss nur etwa ein Viertel seiner Druckfestigkeit. Für Grauguss gilt diese Regel daher nicht.

Bäume können Ingenieuren auch in anderer Hinsicht als Lehrmeister dienen. Sie streben eine gleichmäßige Spannungsverteilung auf der Oberfläche an. Sie erreichen dies, indem sie an Orten höherer Spannung vermehrt Material anlagern [Mat97, S. 22; MT02]. Die Erkenntnis, Spannungsspitzen durch Materialanhäufung abzubauen, ist dem Produktentwickler nicht neu. Lange konnte jedoch kein praktischer Nutzen aus dieser Erkenntnis gezogen werden, weil einem technischen Produkt nicht ohne weiteres anzusehen ist, wo es höher belastet wird. Erst mit der Implementierung der Gesetzmäßigkeiten in eine Berechnungssoftware wurde es möglich, Bauteile zu entwickeln, die eine gleichmäßige Spannungsverteilung aufwiesen.

Bäume haben nur die Möglichkeit, zusätzliches Material anzusammeln. Bestehende Strukturen entfernen, können sie nicht. Für die Entwicklung von Leichtbaustrukturen wäre es jedoch auch sinnvoll, nicht benötigtes Material abzubauen. Ein Vorbild hierfür sind die Fresszellen von Knochen, die kontinuierlich solche Bereiche im Knochen „wegknabbern“, die keine tragende Funktion haben [Mat97, S. 208]. Da sich auch dieser Vorgang in einem Simulationsprogramm abbilden lässt, stehen dem Produktentwickler nun zwei Werkzeuge zur Verfügung, mit denen er spannungsoptimierte Bauteile entwerfen kann. Ausgehend von einem Designraum ermittelt er zunächst mit Hilfe der SKO-Methode<sup>8</sup> die grobe Bauteilstruktur. Mit der CAO-Methode<sup>9</sup> kann er dann in einem zweiten Schritt das Bauteil gezielt an solchen Stellen „wachsen lassen“, an denen durch z. B. durch Kerben höhere Spannungswerte entstehen. Dabei entsteht eine typische Kerbkontur. MATTHECK zeigt in einer neueren Publikation [Mat06], wie sich diese Kontur auch ohne Computer generieren lässt.

Eine weitere Gesetzmäßigkeit, die sich in vielen Bereichen wiederfinden lässt, ist der *Goldene Schnitt* [Bor04; Ros04; Bul04]. Er beschreibt das Wachstumsverhalten von Muscheln und anderen Strukturen der Natur, findet sich als Konstruktionsmerkmal in geometrischen Figuren, ist ein Maß der Ästhetik und Harmonie und vieles mehr. Es handelt sich um ein Verhältnis zweier Zahlen, bei dem sich die größere zur kleineren verhält wie die Summe aus beiden zur größeren. Das Bild 6.8 verdeutlicht den Goldenen Schnitt am Beispiel selbstähnlicher Rechtecke.

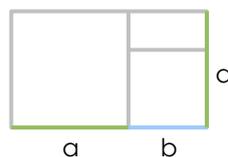


Bild 6.8: Goldener Schnitt bei Rechtecken

Der Goldene Schnitt ist eng verknüpft mit der Fibonacci-Reihe, bei der sich die nächste Zahl aus der Summe der beiden vorangegangenen berechnet. Im Unendlichen entspricht das Verhältnis zwischen

<sup>8</sup> SKO – Soft Kill Option; simuliert die Arbeit von Knochenfresszellen

<sup>9</sup> CAO – Computer Aided Optimisation; simuliert das adaptive Baumwachstum

Vorgänger und Nachfolger dem Goldenen Schnitt [Bor04, S. 403]. Der Goldene Schnitt  $\Phi$  ist eine irrationale Zahl. Mathematisch lässt sich das Verhältnis gemäß der nachfolgenden Formel ausdrücken.

$$\Phi = 1 + \frac{\sqrt{5}}{2} = 1 + \frac{1}{\Phi} \approx 1,61803$$

Für die Produktentwicklung ist der Goldene Schnitt nicht nur wegen seiner ästhetischen Komponente interessant. Er hat auch, wie z. B. ROSSON [Ros04] und BORGES [Bor04] zeigen, eine Bedeutung für die Mechanik. So weist ROSSON [Ros04] am Beispiel des einseitig eingespannten Balkens (Bild 6.9) nach, dass sich mit

$$\varphi = \frac{1}{\Phi} = \Phi - 1 \approx 0,61803$$

die Verschiebung am Punkt der Krafteinleitung (B) aus dem Produkt der Verschiebung am Ende des Balkens (C) und dem Faktor  $\varphi^{3n}$  bestimmen lässt, wenn der Punkt der Krafteinleitung  $\varphi^n$  der Gesamtlänge des Balkens entspricht.

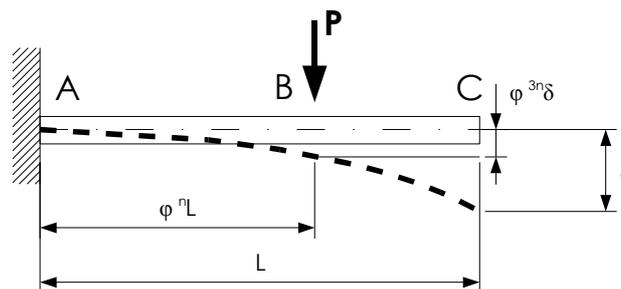


Bild 6.9: Goldener Schnitt im eingespannten Balken

Ähnliche Beziehungen gelten auch für das Biege-, Trägheit- und Widerstandsmoment. Tatsächlich scheint der Goldene Schnitt ein definierender Parameter bei der Spannungsanalyse von Balken zu sein [Bor04, S. 408]. Für den Produktentwickler ergeben sich hieraus vereinfachte Beziehungen, die er zur Auslegung von Strukturen nutzen kann.

## 6.2.6 TRIZ und Bionik

Unter TRIZ versteht man die Theorie des erfinderischen Problemlösens [Alt84, S. 29]. Sie geht im Wesentlichen auf Arbeiten von ALTSCHULLER zurück. Im Gegensatz zum Brainstorming und anderen Lösungsfindungsverfahren, die sich zu einem großen Teil auf Versuch und Irrtum stützen, versucht TRIZ die Lösungssuche gezielt in eine erfolgversprechende Richtung zu lenken. Wesentliche Denkmodelle dabei sind die *Ideale Maschine* [Alt73, S. 59 ff.] und das *Überwinden technischer Widersprüche* [Alt73, S. 77 ff.].

Das Denkmodell der Idealen Maschine beschreibt die zu entwickelnde Lösung in ihrer Idealform, d. h. die Maschine oder das Produkt soll seine Funktion (nahezu) von allein erfüllen. Um dies zu erreichen, werden die Entwicklungstrends von technischen Systemen berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4). ALTSCHULLER stellte bei der Analyse zahlreicher Patente fest, dass Innovationen oft dadurch gekennzeichnet sind, dass sie technische Widersprüche überwinden. Die Lösung der Widersprüche erfolgt durch eine überschaubare Zahl allgemeingültiger Prinzipien. Dabei handelt es sich um „*Operationen zur Transformation technischer Systeme (Erzeugnisse, Vorrichtungen) oder technischer Prozesse (Verfahren) in neue Systeme oder Prozesse*“ [Alt84, S. 86]. Diese Prinzipien wurden in einer Tabelle zusammengefasst, die dem Produktentwickler anzeigen, welche Prinzipien bei der Lösung der verschiedenen technischen Widersprüche mit besonderer Aussicht auf Erfolg angewendet werden sollten.

TRIZ fordert den Produktentwickler auf, das Problem zu analysieren und den zugrunde liegenden Widerspruch herauszuarbeiten. Die Beschreibung des Widerspruchs erfolgt durch zwei abstrakte Parameter. Der erste Parameter soll durch die angestrebte Lösung verbessert werden, gleichzeitig darf sich der zweite jedoch nicht verschlechtern. Mit diesem Widerspruch wählt der Produktentwickler aus der Tabelle ein abstraktes Lösungsprinzip, das er dann im Kontext der Aufgabenstellung interpretieren und anwenden muss. Wie die Darstellung der Vorgehensweise zeigt, macht TRIZ trotz einer weitgehenden Algorithmisierung der Vorgehensweise das Denken nicht überflüssig. Vielmehr verlangt es vom Produktentwickler Abstraktionsvermögen und die Fähigkeit, Probleme auf fundamentale Widersprüche zurückzuführen. Um diese Fähigkeiten auszuprägen und die Methodik nutzbringend anzuwenden, bedarf es einiger Übung.

VINCENT & MANN machen darauf aufmerksam, dass die Lösungen, die bis heute im Rahmen von TRIZ analysiert und auf verallgemeinerbare Prinzipien untersucht worden sind, vor allem physikalischer, chemischer und mathematischer Natur sind [VM02, S. 159]. Der Anteil biologischer Lösungen ist eher gering einzuschätzen. Ungeachtet dessen lässt sich feststellen, dass es biologischen Systemen in herausragender Weise gelingt, scheinbare Widersprüche zu überwinden. Sie erscheinen dem Betrachter in vieler Hinsicht als ideale Systeme. Sowohl in der Technik als auch in der Natur ist ein Trend hin zu maximalem Nutzen bei gleichzeitig minimalem Aufwand zu beobachten.

Vor diesem Hintergrund scheint es sinnvoll zu überprüfen, ob auch die Lösungen der Natur den TRIZ-Prinzipien unterliegen. VINCENT & MANN weisen darauf hin, dass nicht alle Prinzipien, die in TRIZ aufgeführt sind, sich auch in der Natur finden lassen. In der Umkehrung muss daher ebenso gefragt werden, ob es in der Natur Prinzipien gibt, die im Rahmen der TRIZ-Forschung bislang noch nicht entdeckt wurden [VM02, S. 165 f.].

In ähnlicher Weise argumentiert auch GÜNTHER [Gün04] und zeigt auf, wie sich die Bionik in die TRIZ-Methodik integrieren lässt (Bild 6.10). Die Einbeziehung der Bionik zur Effektivitätserhöhung der Ideenfindung sieht er vor allem in den TRIZ-Arbeitsschritten „Lösungsfindung in der Modell-ebene“ und „Lösungsspezifizierung“. Um die Bionik dem TRIZ-Anwender zugänglich zu machen, muss Bionik-Wissen in die TRIZ-Bausteine eingearbeitet werden. GÜNTHER regt daher an, eine Aufstellung biologischer Effekte und Ressourcen zu erarbeiten und nach „Innovationsprinzipien der Natur“ zu suchen. Die gefundenen Erscheinungen sollten dann mit bekannten und möglichen technischen Anwendungen in Verbindung gebracht werden, um dem TRIZ-Anwender, der in der Regel kein Biologe sein wird, den Einstieg zu erleichtern. Das Bild 6.10 stellt die Integration des Bionik-Wissens in die TRIZ-Methodik schematisch dar.

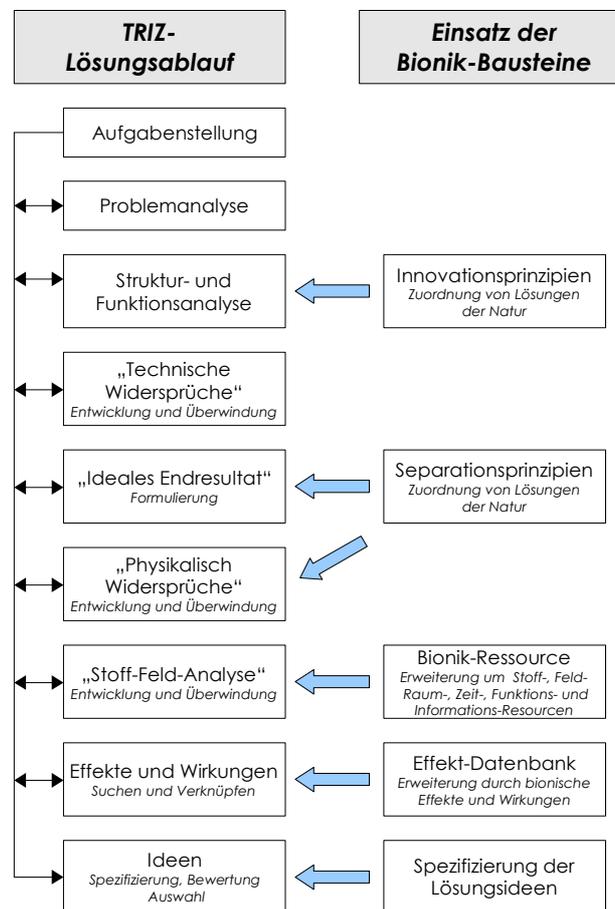


Bild 6.10: Integration der Bionik in die TRIZ-Werkzeuge [Gün04]

Die Vorgehensweise nach TRIZ stützt sich, wie oben dargestellt wurde, auf eine Tabelle, in der den technischen Widersprüchen Lösungsprinzipien zugeordnet werden. Mit Erweiterung der Möglichkeiten computerunterstützter Datenverarbeitung ändert sich auch die Handhabung von TRIZ. Musste der Produktentwickler ursprünglich in der Tabelle händisch die durch Zahlen codierten Prinzipien ermitteln, stehen ihm hierfür heute leistungsfähige Softwarewerkzeuge zu Verfügung. Sie führen ihn

schrittweise durch den Prozess und veranschaulichen die abstrakten Lösungsprinzipien durch leichtverständliche Darstellungen.

### 6.2.7 Zusammenfassung

Wie die obigen Ausführungen zeigen, wurden bereits einige Werkzeuge, Methoden und Hilfsmittel entwickelt, die darauf ausgerichtet sind, Erkenntnisse fremder Wissensdomänen der Produktentwicklung verfügbar zu machen. Generell lassen sie sich zwei Ansätze unterscheiden. Zum einen gibt es Werkzeuge, die den Transferprozess selbst unterstützen wollen. Hierzu zählen z. B. die biologischen Konstruktionskataloge und die Assoziationslisten. Zum anderen existieren Werkzeuge, in denen Erkenntnisse einer fremden Wissensdomäne „produktentwicklungsgerecht“ aufbereitet wurden. Zu diesem Ansatz können die Grundprinzipien biologischer Systeme, die allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten aber auch die Bemühungen im Rahmen von TRIZ gezählt werden.

In den Darstellungen wurden die Stärken und Schwächen der genannten Werkzeuge z. T. bereits verdeutlicht. So können die Kataloge biologischer Konstruktionen dem Produktentwickler zwar anhand von Beispielen Ansatzpunkte zur Lösung eines technischen Problem liefern, oftmals bedarf es jedoch noch detaillierter Informationen zu dem einen oder anderen Sachverhalt, um die technische Machbarkeit abschätzen zu können. Der Produktentwickler ist dann gezwungen, zusätzlich zum Katalog andere Informationsquellen zu nutzen, die in der Regel nicht in „seiner“ Sprache formuliert sind.

Etwas anders verhält es sich mit den Grundprinzipien biologischer Systeme und den allgemeingültigen Regeln. Sie lassen sich quasi „sofort einsetzen“, denn der Produktentwickler muss nicht wie in den Katalogen zunächst das zugrunde liegende Prinzip ermitteln und dann dessen Übertragbarkeit prüfen. Die Tatsache, dass das biologische Vorbild in diesem Prozess außen vor bleibt, bringt gewisse Vorteile mit sich. Andererseits wäre es durchaus sinnvoll, die Grundprinzipien mit Beispielen zu verknüpfen, die dem Produktentwickler beim Verständnis der Prinzipien helfen und ihm so schneller einen Weg zur Lösung seines technischen Problems aufzeigen.

Mit den dargestellten Werkzeugen werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Während z. B. die Kataloge biologischer Konstruktionen dem Produktentwickler eher als Quelle der Inspiration und Anregung bei der Gestaltung von Produkten dienen, stellen Regeln wie „in Seilen denken“ relativ konkrete Anweisungen dar. Obwohl die einzelnen Ansätze als separate Lösungen erscheinen, sind sie doch in vielfältiger Weise miteinander vernetzt. Diese Vernetzung der Ansätze tritt bislang nur ungenügend in Erscheinung. Es ist jedoch zu vermuten, dass aus einer Verknüpfung der einzelnen Ansätze Synergieeffekte erwachsen, die sich für die Produktentwicklung nutzen lassen. So könnte z. B. ein Produktentwickler bei der Entwicklung eines technisches Produktes einerseits die Grundprinzipien

biologischer Systeme heranziehen, andererseits wäre er in der Lage, bei Bedarf auch auf entsprechende Beispiele biologischer Systeme zurückzugreifen. Durch die Darstellung der Beispiele würde ihm vor Augen geführt, wie die Natur ihre Lösungen im Sinne der Grundprinzipien realisiert. Der Produktentwickler könnte so einzelne Aspekte der biologischen Lösung in die eigenen technische Umsetzung einfließen lassen.

Im Folgenden soll ein Ansatz beschrieben werden, mit dem die verschiedenen Facetten und Betrachtungsebenen zusammengeführt werden können. Ziel ist es dabei, biologische Systeme in einer für den Produktentwickler geeigneten Form aufzubereiten und ein Werkzeug zu konzipieren, das ihn bei der Lösungssuche unterstützt.

### **6.3 Konzept eines Unterstützungssystems für das bionische Arbeiten**

Basierend auf den obigen Betrachtungen soll im Folgenden ein Ansatz vorgestellt werden, der die für die Produktentwicklung relevanten Aspekte biologischer Systeme miteinander verknüpft. Die Verbindung der einzelnen Fragmente zu einem Gesamtbild verspricht einen leichteren Zugang zu Erkenntnissen, die in anderen Wissensdomänen gewonnen wurden und eine effektiver Nutzung dieses Wissens im Rahmen der Lösungsfindung.

#### **6.3.1 Vorbetrachtungen**

Die Grundlage des Ansatzes bildet das in Kapitel 5.2 vorgestellte bionische Analogiemodell. Wie dort bereits geschildert, zielt das Modell darauf ab, das biologische System und die zu entwickelnde technische Lösung ganzheitlich miteinander zu vergleichen. Dadurch wird deutlich, welche Aspekte des biologischen Systems im Rahmen der Produktentwicklung relevant sind und welche vernachlässigt werden können. Für die relevanten Aspekte kann der Produktentwickler dann prüfen, inwiefern sie „technikkompatibel“ sind und welche Alternativen ihm gegebenenfalls zur Verfügung stehen. Die Bildung des Analogiemodells erfolgt, wie in Kapitel 5.2.2 dargestellt, in drei Stufen:

- Identifizieren und Zusammentragen der zu untersuchenden Aspekte
- Darstellen der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den betrachteten Aspekten
- Aufbau des Analogiemodells durch einen iterativen Mapping-Prozess

Behindern Wissensdefizite den Aufbau des ganzheitlichen Analogiebildes, kann das Hinzuziehen von Experten einen Ausweg aufzeigen. Steht dem Produktentwickler diese Möglichkeit nicht zur Verfügung oder kommt ein solcher Dialog zeitnah nicht zustande, stellt sich die Frage nach einem „Ersatz-Experten“ und einer anderen Form der Wissensvermittlung. Eine Alternative stellt hier die computerunterstützte Wissensvermittlung dar.

Die Möglichkeiten der elektronischen Speicherung und Verarbeitung von Wissen werden seit einigen Jahren auch im Schrifttum der Produktentwicklung intensiv diskutiert. Die Vielfalt der Aspekte des Wissensmanagements kommt dabei auch in der Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zum Ausdruck. Diese reichen von grundlegenden Arbeiten zum Thema der Wissensrepräsentation [SKB99; TWW01; DCP01], über Fallstudien zum Informationsmanagement in der Industrie [FB99; ALA+03] bis hin zur prototypischen Umsetzung von computerbasierten Unterstützungssystemen [AK99; WSW+03]. Eine ausführliche Darstellung und Würdigung kann und soll an dieser Stelle nicht erfolgen. Es lässt sich jedoch feststellen, dass die meisten der im Schrifttum diskutierten Ansätze darauf abzielen, das Wissen, das in einem Unternehmen vorhanden ist, zu verwalten. Dies hat Konsequenzen in mehrerlei Hinsicht. So wird durch die angestrebten Wissensmanagementsysteme – ungeachtet der Komplexität der Zusammenhänge – eine verhältnismäßig kleine Wissensdomäne repräsentiert. Des Weiteren soll das Wissen zwar innerhalb des Unternehmens verfügbar sein, vor dem Zugriff durch unbefugte Dritte muss es jedoch geschützt werden. Pflege und Wartung des Systems (Aktualisierung des Wissens) müssen daher durch das Unternehmen selbst erfolgen, das hierzu entsprechende Ressourcen bereitstellen muss.

Die diskutierten Systeme haben in erster Linie das schnelle Finden der benötigten Informationen zum Ziel. Der Lernaspekt des Anwenders spielt bei den im Schrifttum der Produktentwicklung diskutierten Ansätzen oft eine zu vernachlässigende Rolle. Eine Ausnahme bilden Systeme, die für die Aus- und Weiterbildung konzipiert und hier auch genutzt werden. Beispiele für solche Systeme sind *Pro-Teach-Net* [ZV03] und *pinngate* [WSW+03]. Die Konzeption dieser Systeme sieht ebenfalls eine zentrale Wartung und Pflege vor. Dies hat zu Folge, dass das Erstellen und Aktualisieren der Lehrinhalte für die Verantwortlichen mit einem entsprechend hohen Aufwand verbunden ist.

Das Wissensmanagement spielt in der Forschungslandschaft der Produktentwicklung seit einigen Jahren eine bedeutende Rolle. Trotz intensiver Bemühungen und einer Vielzahl von Ansätzen ist der praktische Einsatz von Wissensmanagementsystemen auch heute noch mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Ein Grund hierfür ist sicherlich die Komplexität der Thematik und die (im Vergleich hierzu) begrenzten technischen Möglichkeiten. Andererseits ist festzustellen, dass viele der Ansätze zwar bis zur prototypischen Umsetzung entwickelt, dann aber nicht weiterverfolgt werden. Es stellt sich daher die Frage, ob die Ursachen für das „Scheitern“ eines Wissensmanagementsystems nicht auch konzeptioneller Natur sind. Die Wartung und Pflege des Wissens bedürfen eines nicht unerheblichen Aufwands. Oft kann dieser Aufwand dauerhaft nicht geleistet werden, weil die notwendigen Ressourcen („Wissensmanager“) nicht zur Verfügung stehen.

Eine zentrale Verwaltung des Wissen durch entsprechend geschulte Personen ist in vielen Fällen sinnvoll. Ein solches Konzept gewährleistet, dass das Wissen entsprechend der vorgegebenen Struk-

tur abgelegt wird und das System arbeitsfähig bleibt. Auf der anderen Seite kann das System auch an Dynamik und Flexibilität verlieren, wenn die „Wissensmanager“ mit der schnelllebigen Entwicklung nicht Schritthalten können. Ein System, bei dem das Wissen weniger in einer festgelegte Struktur gepresst wird und das auf einer dezentralen Verwaltung basiert, kann in diesem Fall die bessere Wahl sein.

Aus den Darstellungen oben leiten sich erste Ansätze für die Konzeption eines System zur Unterstützung der Analogiebildung im Rahmen der Lösungsfindung ab. Das System muss, entgegen den oben diskutierten, in der Lage sein, das Wissen verschiedener Fachbereiche abzubilden und miteinander in Beziehung zu setzen. Die Vielfalt der repräsentierten Themengebiete und der Aufwand, ein solches System aufzusetzen, lassen eine zentrale Pflege und Wartung durch einige wenige geschulte Personen unrealistisch erscheinen. Der Aufbau eines solchen Unterstützungssystems bedarf der Mitwirkung vieler Personen, die Experten in ihren jeweiligen Fachgebieten sind.

Ausgehend von den bisherigen Betrachtungen lassen sich wesentliche Forderungen an das Unterstützungssystem ableiten und das Konzept in groben Zügen skizzieren:

**Leichte Zugänglichkeit:** Der Aufbau und die Pflege des Unterstützungssystem soll durch eine Vielzahl von Experten erfolgen, die über die Grenzen von Unternehmen und Organisationen hinweg an der Gestaltung des Systems mitwirken. Das Unterstützungssystem muss daher ein verteiltes Arbeiten ermöglichen, von überall erreichbar und leicht zugänglich sein. Das System sollte auf der Seite des Anwenders keine spezielle Software voraussetzen. Für eine solche Anwendung bietet sich daher eine Server-Client-Konstellation mit dem Internet als Plattform an.

**Einfache Handhabung:** Das Unterstützungssystem wird nur dann eine breite Anwendung finden, wenn seine Handhabung einfach und intuitiv ist. Dies gilt nicht nur für die Anwendungsseite. Da auch das Einstellen neuer Inhalte und das Verändern bestehender durch die Anwender selbst erfolgen soll, darf die Wartung und Pflege des Systems kein Expertenwissen voraussetzen. Der administrative Aufwand muss sich auf ein Minimum beschränken.

**Verständliche Aufbereitung des Wissens:** Mit dem Unterstützungssystem soll ein Ersatz für den direkten Dialog und das persönliche Gespräch zwischen Experten und Laien geschaffen werden. Da die Kommunikation über das System nur einseitig (oder zumindest mit gewissen zeitlichen Differenz) erfolgt, muss das Wissen für den Adressaten verständlich aufbereitet werden. Die Formulierungen sollten frei von Fachsprache sein, so dass Rückfragen, die auf Unklarheiten beruhen, auf ein Minimum reduziert werden.

**Problembezogene Darstellung des Wissens:** Bionik ist vielfältig. Sie verbindet nicht nur verschiedene Fachbereiche miteinander, sie findet auch auf unterschiedlichen Konkretisierungsstufen statt. Zwischen der Beschreibung des „reinen“ biologischen Systems und der Darstellung der „reinen“ technischen Problemstellung existieren viele Abstufungen. Ein Unterstützungssystem muss dem gerecht werden und dem Anwender die gewünschten Informationen in der richtigen Form bereitstellen. Der Anwender muss zudem in die Lage versetzt werden, zwischen den verschiedenen Ebenen zu wechseln, so dass er gegebenenfalls auf weiterführende Informationen zugreifen oder andere Sichtweisen einbeziehen kann.

Im Hinblick auf die Realisierung des Unterstützungssystems ist es sinnvoll weitestgehend auf bestehende Technologien zurückzugreifen. Hierdurch wird eine schnelle Implementierung möglich, da zusätzlicher Aufwand für Programmierung eines neuen Systems vermieden wird. Nachteilig an diesem Ansatz ist die Tatsache, dass unter Umständen bestimmte Funktionalitäten in den bestehenden Technologien nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung stehen und dass aus diesem Grund für die Realisierung Kompromisse in Kauf genommen werden müssen.

Basierend auf den oben formulierten Anforderungen wird für die Realisierung des Unterstützungssystems für die Bionik die Verwendung eines *Semantischen Wikis* [Sch06a; VKV+06] vorgeschlagen. Im Folgenden soll zunächst das Wiki-System kurz erläutert werden, um darauf aufbauend das Konzept für ein Unterstützungssystem für die Bionik zu skizzieren.

### 6.3.2 Wikis und semantische Wikis

Ein Wiki<sup>10</sup> ist eine Sammlung von Seiten im Internet, die durch Hyperlinks miteinander verbunden sind. Im Gegensatz zu traditionellen Internetseiten kann der Besucher einer Wiki-Homepage die Seiten nicht nur lesen, sondern auch online ändern [Sch06a]. Die Modifikation der Seiten erfolgt im Browser selbst. Die hierfür notwendige Software ist in der Regel serverseitig implementiert, so dass die technischen Voraussetzungen beim Anwender minimiert werden können.

Die Einsatzmöglichkeiten eines Wikis sind vielfältig. Sie entstanden ursprünglich im Umfeld der Softwareentwicklung und dienten hier der Dokumentation [Möl04]. Generell eignen sich Wikis zur Verwaltung großer Textmengen, die an vielen Stellen hin und wieder geändert werden müssen. Da jedoch moderne Wiki-Systeme in der Regel auch den Upload beliebiger anderer Daten erlauben, hat sich ihr Anwendungsspektrum inzwischen stark erweitert. Sie werden für den Aufbau von Enzyklopädien genutzt, dienen als Werkzeuge im Rahmen des Projektmanagements, eignen sich als Content-Management-System (CMS) und vieles mehr. Wegen ihres breitgefächerten Anwendungsspektrums

---

10 Der Begriff „Wiki“ entstammt dem Hawaiianischen und bedeutet hier „schnell“ [Sch06a].

und nicht zuletzt auch wegen der Möglichkeit, mit Hilfe der API<sup>11</sup> weitere Applikationen zu integrieren, werden Wikis auch zunehmend in Unternehmen eingesetzt [Tho05].

Die Seiten eines Wikis werden im Allgemeinen in einer speziellen Syntax verfasst<sup>12</sup>. Hierbei handelt es sich um ein vereinfachtes Hypertextformat, das sehr schnell zu erlernen ist [Sch06a]. So wird z. B. in HTML durch die Angabe `<a href=themen.html>Themen</a>` ein Link zu der Seite „Themen“ erstellt. In der Wiki-Syntax genügt eine Formatierung in der Form von `[[Themen]]`. Der Begriff wird so zu einem Link, der auf die gleichnamige Seite führt. Existiert eine Seite dieses Namens nicht, legt das System automatisch eine leere Seite an. Durch die Vereinfachung der Formatierungssyntax wird eine großen Gruppe von Menschen, insbesondere Computer-Laien, angesprochen, an der Gestaltung des Wikis mitzuwirken.

Das freie und unbeschränkte Editieren von Inhalten ist das Wesen der Wiki-Kultur und führt zu einer effektiven Zusammenarbeit der beteiligten Personen [Tho05]. Gleichwohl unterstützen die meisten Wiki-System auch eine Zugriffssteuerung und eine Revisionskontrolle. Einer mutwilligen Beschädigung der Seiteninhalte kann so vorgebeugt werden und eventuelle Fehler lassen sich schnell rückgängig machen. Wird eine Seite tatsächlich absichtlich zerstört, sorgt der Einfluss der Anderen dafür, dass der Schaden schnell korrigiert wird.

Semantische Wikis stellen eine Weiterentwicklung bestehender Wiki-Konzepte dar. Sie sind gegenwärtig noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. In einem „normalen“ Wiki haben die Seiten keine vorgegebene Struktur. Links zu anderen Seiten werden durch den Benutzer frei definiert. Dies erschwert eine maschinelle Auswertung, da die Suchalgorithmen nicht in der Lage sind, die Bedeutung der Links zu „verstehen.“ In semantischen Wikis werden hingegen neben den Inhalten einer Seite auch die dazugehörigen Metadaten gespeichert. Dies geschieht in der Regel über *kommentierte Relationen* [Sch06a]. So lassen sich, wie in Bild 6.11 dargestellt, z. B. die zwei Artikel „Zahnrad“ und „Welle“ durch die Relation „ist\_befestigt\_auf“ beschreiben.



Bild 6.11: Beispiel einer semantischen Relation

Neben den kommentierten Relationen zu anderen Seiten können einer Wiki-Seite auch *Attribute* mitgegeben werden. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn Informationen hinzugefügt werden, für die keine eigene Webseite angelegt werden soll [VKV+06]. Das Bild 6.12 gibt hierfür ein Beispiel. Es ist einsehbar, dass es nicht sinnvoll ist, in einem Artikel mit einer Bauteilbeschreibung für die Gewichtsangabe eine eigene Seite anzulegen. Analoges gilt für andere Angaben zum Bauteil. Dies würde

<sup>11</sup> API – Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)

<sup>12</sup> In neuere Wiki-Systeme lässt sich der Text auch mit Hilfe einer grafischen Benutzungsoberfläche formatieren. Die Notwendigkeit, eine spezielle Syntax zu erlernen, entfällt in diesem Fall.

schnell zu einer unüberschaubaren Anzahl nutzloser Seiten führen und der Transparenz der Struktur schaden.



Bild 6.12: Beispiel einer Relation zu einem Attribut

Semantische Relationen lassen sich vielfältig nutzen. Mit ihrer Hilfe können z. B. Menüs mit Links zu anderen relevanten Seiten dynamisch erzeugt werden. Semantische Relationen tragen so dazu bei, die Navigation zwischen den Seiten verbessern. Darüber hinaus lassen sie sich als Filter für eine erweiterte Suche einsetzen [Sch06a]. Sie ermöglichen Suchanfragen, die über eine reine Schlagwortsuche hinausgehen. Die Zeichenketten werden nicht nur auf Übereinstimmung verglichen, semantische Relationen können auch Synonyme erkennen und diese auswerten. Durch die Verwendung von Semantik werden Suchalgorithmen die Lage versetzt, die Bedeutung eine Suchanfrage „zu verstehen“ und auf Anfragen wie „Wieviele Zahnräder mit dem Teilkreisdurchmesser von mehr als 10 cm sind auf der Welle befestigt?“<sup>13</sup> die korrekte Antwort zu liefern.

Die Grundlage der oben geschilderten Notation bildet der RDF-Standard<sup>14</sup>, der vom World Wide Web Consortium entwickelt wurde [KG04]. Die RDF-Notation stellt Beziehungen in der Form eines Tripels dar, das aus der Ressource, der Relation und dem Objekt besteht und das sogenannte *statement* bildet. Für die Darstellung kann wie in den Bildern oben ein Graph verwendet werden. Für die maschinelle Auswertung wird das Tripel jedoch häufig durch eine XML-Syntax beschrieben.

Eine Erweiterung des RDF-Standards wurde mit der OWL-Spezifikation<sup>15</sup> geschaffen. Diese ergänzt RDF, um die Möglichkeit Klassen, Eigenschaften und Instanzen beschreiben zu können [CMV+05]. Eine Klasse (oft auch als Konzept bezeichnet) umfasst dabei eine Gruppe von Objekten, die gemeinsame Eigenschaften haben. Ein Objekt ist die Instanz einer Klasse. Analog zur objektorientierten Programmierung erlaubt es die OWL-Spezifikation durch Vererbung Hierarchien von Klassen und Eigenschaften zu erstellen und so komplexe Strukturen zu beschreiben.

Strukturen, die durch Konzepte und Relationen spezifiziert sind, werden in der Informatik im Bereich der Wissensrepräsentation als Ontologien bezeichnet. Das Bild 6.13 stellt auszugsweise eine einfache, hierarchisch aufgebaute Ontologie dar<sup>16</sup>. An oberster Stelle steht das Konzept „Maschinenelement“. Ihm wurde die Eigenschaft „Lebensdauer“ zugewiesen. Von der Klasse „Maschinenelement“ sind die Konzepte „Lager“ und „Dichtung“ abgeleitet. Sie fassen Instanzen mit gleicher Funktionalität zusammen. Da die Konzepte von der Klasse „Maschinenelement“ abgeleitet wurden,

<sup>13</sup> Aktuelle Wiki-Software ist noch weit davon entfernt, Fragestellungen in dieser Form zu verstehen. Tatsächlich müssen die Fragen in einer maschinen-verständlichen Sprache eingegeben werden. Vgl. Kapitel 6.3.4.

<sup>14</sup> RDF – Resource Description Framework

<sup>15</sup> OWL – Web Ontology Language

<sup>16</sup> Ontologien bilden in der Regel Netzwerkstrukturen. Sie sind nicht zwingend hierarchisch aufgebaut.

haben auch ihre Instanzen die Eigenschaft „Lebensdauer“. Darüber hinaus können in einer Unterklasse weitere Eigenschaften spezifiziert werden. So ist es z. B. denkbar, der Klasse „Lager“ die Eigenschaften „Tragzahl“ und „Anzahl der Freiheitsgrade“ zu zuweisen.

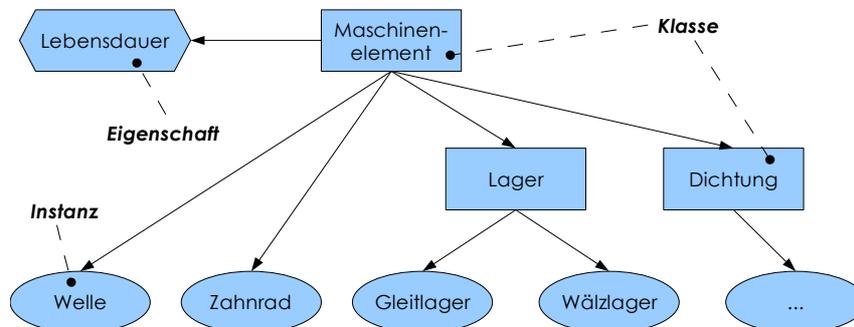


Bild 6.13: Beispiel einer Klassenhierarchie

Die Ausführung zeigen, dass mit RDF und OWL formale Sprachen zur Verfügung stehen, die genutzt werden können, um in einer Webseite Informationen über diese Seite und ihrer Beziehung zu anderen Webseiten zu speichern. Die Informationen lassen sich maschinell auswerten, da sie durch logisches Schließen erfasst werden können [MH04]. Im Folgenden soll gezeigt werden, wie sich dies für das Unterstützungssystem der Bionik nutzen lässt. Es wird ein Konzept für ein semantisches Wiki erarbeitet, in dem Informationen zu biologischen Systemen und ihrem Anregungspotential für die Produktentwicklung strukturiert abgelegt sind.

### 6.3.3 Ontologie des Unterstützungssystems

Für die Entwicklung von Ontologien wurde eine Methodik geschaffen, die an das Vorgehen bei der Softwareentwicklung angelehnt ist [FGJ97]. Um eine ontologische Struktur zu erstellen, sind demnach die folgenden Schritte zu durchlaufen:

- **Spezifizieren:** In dieser Phase wird festgelegt, welchen Zweck die Ontologie erfüllen und welches Ziel durch die Strukturierung erreicht werden soll. Zudem werden die Anwender identifiziert und mögliche Nutzungsszenarien dargestellt.
- **Konzipieren:** Ziel dieser Aktivität ist es, die zu speichernden Informationen zu identifizieren und zu strukturieren. Zur Identifizierung werden Techniken der Wissensakquise genutzt. Für die Strukturierung der Informationen sollten allgemein verständliche Darstellungsformen (z. B. Tabellen oder Graphen) gewählt werden. Sie dienen als Kommunikationsmittel zwischen den „Wissensträgern“ und den Entwicklern der Ontologie.
- **Formalisieren:** In diesem Schritt wird das Konzept der Ontologie in eine maschinen-verständliche Sprache übersetzt. Da für die Entwicklung von Ontologien meist Softwarewerkzeuge

genutzt werden, die aus einer Graphendarstellungen automatisch eine formale Sprache ableiten können, ist das Formalisieren nicht als eigenständige Aktivität zu verstehen.

- **Implementieren:** Mit dieser Phase wird das Konzept der Ontologie umgesetzt und den Anwendern in Form einer Softwareapplikation zur Verfügung gestellt. In der Regel bieten semantische Wikis Schnittstellen an, mit denen Hilfe bestehende Ontologien importiert werden können.
- **Warten und Anpassen:** Dieser Schritt umfasst das Aktualisieren und gegebenenfalls die Korrektur der ontologischen Struktur. Anpassungen werden auch dann erforderlich, wenn eine neue Ontologie aus einer bestehenden abgeleitet werden soll, um sie z. B. einer anderen Anwendung zur Verfügung zu stellen.

Die obengenannten Schritte beschreiben die Vorgehensweise des technischen Entwicklers. Der Prozess der Ontologieentwicklung umfasst jedoch auch Aktivitäten in den Bereichen Management und Support [CFG+05]. Zu den Managementaufgaben gehören z. B. Zeit- und Ressourcenplanung, Steuerung und Qualitätssicherung. Bei den Aufgaben im Bereich Support handelt es sich im Wesentlichen um entwicklungsbegleitende Tätigkeiten. Hierzu zählen z. B. die Akquisition von Wissen, das Bewerten von alternativen Lösungen und die Dokumentation.

Im Folgenden soll die Ontologie für das Unterstützungssystem skizziert werden. Die Darstellung beschränkt sich jedoch auf die Phase der Konzeption. Die Schritte in Richtung einer prototypischen Umsetzung werden nur ansatzweise beschrieben, da sie nicht im Fokus dieser Arbeit liegen. Die Spezifikationsphase wird ebenfalls im Folgenden näher nicht diskutiert. Wie bereits deutlich wurde, soll die Ontologie im Rahmen eines semantischen Wikis verwendet werden. Als Anwender des Systems werden vorrangig Produktentwickler gesehen, die das Wiki zu Recherchezwecken nutzen. Zudem ist vorgesehen, dass die Inhalte durch Fachexperten in das System eingestellt und strukturiert werden.

Das zu konzipierende Unterstützungssystem soll das Wissen mehrerer Fachgebiete zusammenführen und darstellen. Für den Aufbau der Ontologie, d. h. die Definition von Objektklassen und ihrer Relationen zum Zweck der Wissensrepräsentation, müssen zunächst die Informationen zusammengetragen werden, die durch die Ontologie strukturiert werden sollen. Hierbei ist festzustellen, dass das Wissen, das es im Rahmen der Bionik zu strukturieren gilt, vielfältig ist. Um diese Vielfalt abbilden zu können, wird für die Ontologie ein relativ hoher Abstraktionsgrad gewählt. Gleichzeitig ist jedoch auch darauf zu achten, dass die gewählte Struktur in der Lage ist, verschiedene Detaillierungsebenen abzubilden, und dass die Relationen zwischen den Klassen der Arbeitsweise des Produktentwicklers und seines Vorgehens bei der Recherche Rechnung tragen.

Die Vorgehensweise zur Bildung von Analogien wurde in Kapitel 5.2.2 durch das bionische Analogiemodell beschrieben. Dabei wurden das biologische System und das technische System anhand verschiedener Aspekte analog gegenübergestellt und so ein ganzheitliches Analogiebild geschaffen. Da das Arbeiten mit dem Unterstützungssystem dieser Vorgehensweise gerecht werden soll, erfolgt die Gestaltung der Ontologie auf der Basis des bionischen Analogiemodells. Bevor die Grundstruktur der Ontologie festgelegt wird, soll im Folgenden noch einmal kurz dargestellt werden, wie Analogien gemäß dem Analogiemodell gebildet werden.

Für den Produktentwickler ist das biologische System ein Vorbildobjekt, das ihm hinsichtlich bestimmter Aspekte Anregungen zur Gestaltung seiner technischen Lösung liefert. Er findet dieses Vorbildobjekt meist aufgrund einer zufälligen Assoziation mit seiner antizipierten technischen Lösung. Ähnliche Randbedingungen zwischen dem technischen System und dem biologischen System können ebenfalls den Weg zu einem möglichen Vorbildobjekt weisen.

Hat der Produktentwickler ein Vorbildobjekt gefunden, muss er entscheiden, wo die Möglichkeiten und Grenzen der analogen Übertragung liegen. Es kann hilfreich sein, diesen Entscheidungsprozess durch die Darstellung von Beispielen erfolgreicher technischer Umsetzungen zu unterstützen. Für die Gestaltung der Ontologie lassen sich daher die drei „Ankerpunkte“ *Vorbildobjekt*, *Analogieaspekt* und *Umsetzungsbeispiel* finden und als Klassen der Ontologie formulieren.

In der ontologischen Struktur werden die aus den „Ankerpunkten“ abgeleiteten Konzepte zueinander in Beziehung gestellt. So kann ein Vorbildobjekt einen oder mehrere Analogieaspekte haben, die auch für das Umsetzungsbeispiel relevant sind. In der Umkehrung lassen sich über die Analogieaspekte eines Umsetzungsbeispiels auch die Vorbildobjekte identifizieren. Vorbildobjekte und Umsetzungsbeispiele sind somit über ihre gemeinsamen Analogieaspekte miteinander verbunden. Das Bild 6.14 stellt dies in der Form eines OWL-Graphen dar und gibt für die genannten Klassen der Ontologie je ein Beispiel. Im semantischen Wiki werden diese Beispiele in Form von Artikeln zu finden sein. Aus Sicht der Ontologie stellen sie Instanzen der jeweiligen Klasse dar.

Zusätzlich deutet das Bild 6.14 die Aufgaben der Konzepte innerhalb der Struktur an. So werden in der Beschreibungsebene Hintergrundinformationen zum biologischen Vorbild selbst gegeben, seine Beziehungen zu anderen biologischen Systemen beleuchtet und die Aspekte, die für eine technische Problemstellung relevant sein könnten, aufgeführt. Diese Analogieaspekte sollten in der Beschreibungsebene lediglich *benannt* werden. Eine ausführliche Darstellung erfolgt in der Erklärungsebene, wo die Analogieaspekte in separaten Artikeln beschreiben werden. Durch die Trennung ist es möglich, die Analogieaspekte „allgemeingültig“ zu beschreiben, so dass verschiedene Vorbildobjekte und Umsetzungsbeispiele auf dieselben Analogieaspekte verweisen können. Eine redundante Darstellung im Wiki kann so vermieden werden.

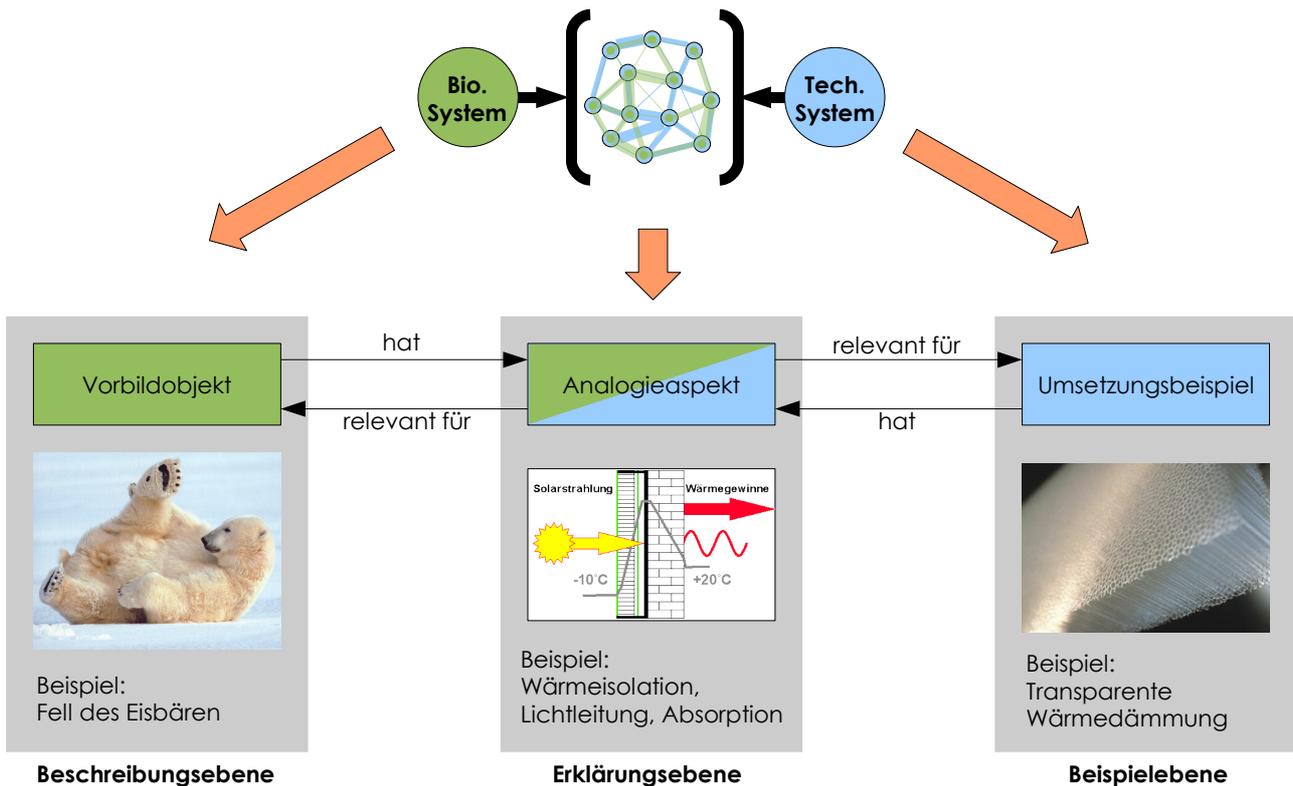


Bild 6.14: Ableitung der Konzepte des Unterstützungssystems aus dem bionischen Analogiemodell

Im Bild 6.14 ist das Fell des Eisbären als Beispiel angegeben. Es ist als Vorbildobjekt für die Entwicklung einer transparenten Wärmedämmung, die in diesem Fall das Umsetzungsbeispiel darstellt, angeführt. Es ist bekannt, dass zwischen den Haaren des Eisbärenfells Luft eingeschlossen ist, die eine wärmeisolierende Schicht bildet. Die Dicke der Isolationsschicht kann der Eisbär durch Anlegen und Aufrichten seiner Fellhaare variieren. Neben der Makrostruktur des Fells kann aber auch die Mikrostruktur der Haare Anregungen für technische Lösungen liefern. Die einzelnen Haare sind hohl und bilden ein zusätzliches Luftposter. Zudem wird angenommen, dass das Licht der Sonne durch die besondere Struktur der Haare auf die schwarze Haut des Bären geleitet wird, wo es absorbiert und in Wärme umgewandelt wird [Tri98]. Auch wenn andere Forschungen zu belegen scheinen, dass das Fell des Eisbären nicht als Lichtleiter fungiert [BS81; Koo98], liefern die genannten Analogieaspekte „Wärmeisolation“, „Lichtleitung“ und „Adsorption“ Impulse für die Entwicklung technischer Wärmedämmungen. Im Wiki werden diese Analogieaspekte, wie erwähnt, in den Beschreibungen des Eisbärenfells (Vorbildobjekt) und der Transparenten Wärmedämmung (Umsetzungsbeispiel) lediglich benannt. Die konkrete Darstellung und eine Erläuterung der Sachverhalte erfolgt hingegen in separaten Artikeln, auf die sowohl die Artikel „Fell des Eisbären“ als auch „Transparente Wärmedämmung“ verweisen.

Die Klassen „Vorbildobjekt“, „Analogieaspekt“ und „Umsetzungsbeispiel“ können als Hauptkonzepte der Ontologie verstanden werden. Für die Strukturierung des Wissens reichen sie jedoch nicht aus.

Besonders auf der Erklärungsebene ist eine weitere Untergliederung sinnvoll, um die Arbeitsweise des Produktentwicklers bei der Recherche in angemessener Weise unterstützen zu können. Wie im Kapitel 5.2 beschrieben wurde, ist es zum Aufbau eines ganzheitlichen Analogiebildes notwendig, nicht allein die technische Funktion für eine analoge Übertragung heranzuziehen. Für die Analogiebildung müssen dazu, die charakteristischen Elemente der beteiligten Analoga untersucht, die relevanten Aspekte herausgestellt und verglichen werden. Darüber hinaus lassen sich auch aus den in Kapitel 6.2 dargestellten Ansätzen Aspekte für die Analogiebildung ableiten. So kann z. B. der technischer Widerspruch, der durch das Vorbildobjekt oder das Umsetzungsbeispiel gelöst wird, als Analogieaspekt verstanden werden. Gleiches gilt für die Grundprinzipien und Gesetzmäßigkeiten, mit denen sich Vorbildobjekte oder das Umsetzungsbeispiele beschreiben lassen. Vor diesem Hintergrund hat die Klasse „Analogieaspekt“ eine ordnende Funktion. Sie beinhaltet Unterklassen, mit denen sich die Vielfalt der bionischen Übertragungsaspekte weiterführend strukturieren lässt. Das Bild 6.15 stellt eine Auswahl möglicher Unterklassen der Form eines OWL-Graphen dar. Wie dort zu erkennen ist, erfolgt die Zuordnung zwischen der Klasse „Analogieaspekt“ und den Unterklassen durch die Relation „Hat Unterklasse“. In der Ontologie ist es vorgesehen, hierzu auch eine inverse Relation „Ist Unterklasse von“ zu definieren. Auf die Darstellung dieser Relationen wurde im Bild 6.15 jedoch zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit verzichtet.

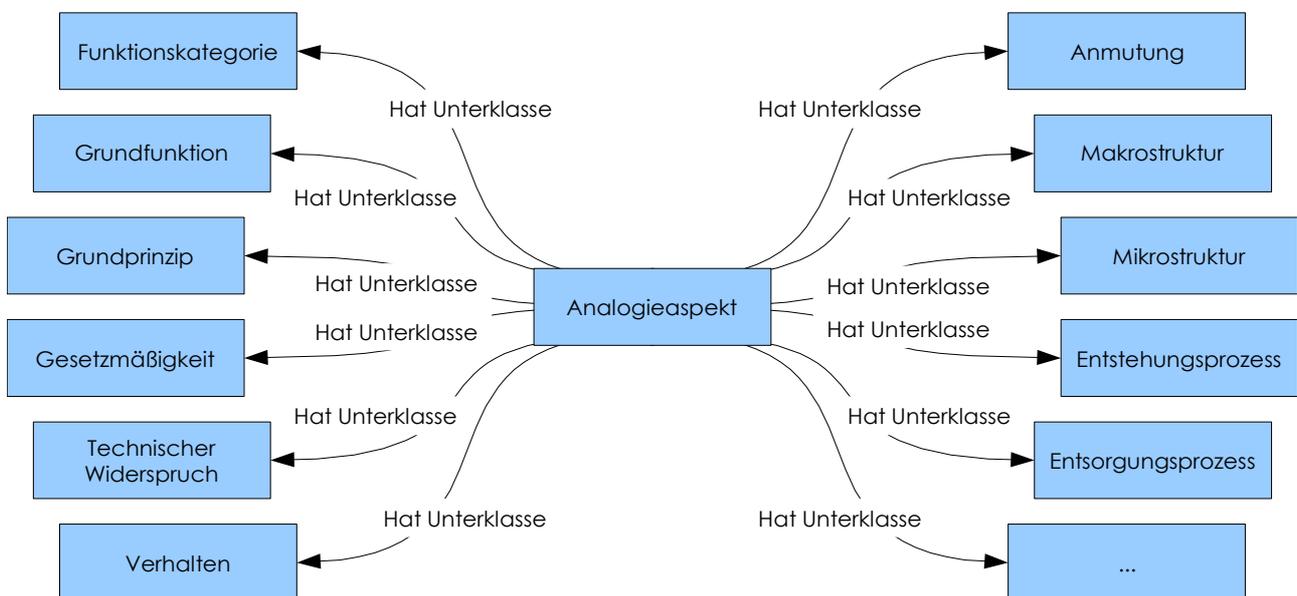


Bild 6.15: Auswahl möglicher Unterklassen des Konzeptes "Analogieaspekt" in OWL-Graphen-Darstellung

Die Klasse „Analogieaspekt“ ist, wie in Bild 6.14 dargestellt wurde, mit Klassen „Vorbildobjekt“ und „Umsetzungsbeispiel“ über die Relation „Relevant für“ verbunden. Für ihre Unterklassen ist es jedoch sinnvoll, eigene Relationen mit aussagekräftigen Bezeichnungen zu definieren, da diese die Unterscheidung der einzelnen Relationen erleichtern. So ist es denkbar, von der Klasse „Grundfunktion“ über die Relation „Grundfunktion relevant für“ auf die Klasse „Vorbildobjekt“ zu verweisen und als

Inverse die Relation „Realisiert Grundfunktion“ zu definieren. In analoger Weise lassen sich Relationen für die anderen Unterklassen von Analogieaspekt finden.

Die Konzepte „Funktionskategorie“ und „Grundfunktion“ im Bild 6.15 spiegeln die Ordnungssysteme der Kataloge von NACHTIGALL und HILL wider (vgl. Kapitel 6.2.1). Die Unterteilung wurde aus methodischen Gründen gewählt. Während das Konzept „Grundfunktion“ die Funktion des Vorbildobjektes in definierter Weise beschreibt (z. B. Verbinden von Stoff), ist mit Hilfe des Konzeptes „Funktionskategorie“ eine weiterführende Einordnung möglich (z. B. Kleben, Klemmen, Festsaugen). Die Bezeichnungen der Grundfunktionen orientieren sich an der von HILL vorgeschlagenen Systematik [Hil98a]. Die Benennung der Funktionskategorien ist hingegen unschärfer. Neben einer Klassifizierung des Zwecks des Systems dienen die Funktionskategorien auch dazu, synonyme Bezeichnungen der Funktion zu erfassen.

Es wurde bereits erwähnt, dass das Wiki den Produktentwickler nicht nur bei der Recherche nach möglichen Vorbildobjekten unterstützen soll. Das System soll ihm auch aufzeigen, wo er weiterführende Informationen zur Lösung seines Problems erhalten kann. Um dies zu erreichen, sollten im Wiki neben der Darstellung der Sachverhalte auch Verweise auf Publikationen und Kontaktdaten von Organisationen hinterlegt werden. Durch sie erhält der Produktentwickler einen schnellen Zugriff auf vertiefende Informationen und kann sich bei offenen Fragen gezielt an die entsprechenden Experten wenden. Der Wiki fungiert damit nicht nur als Werkzeug für die Recherche sondern auch als Kontaktbörse und Projektplattform.

Die Informationen zu Publikationen und Kontakten müssen ebenfalls in die Ontologie eingebunden werden. Sie werden daher als Klassen definiert und über entsprechende Relationen mit den anderen Konzepten verbunden. Das Bild 6.16 zeigt die Struktur, wie sie im Unterstützungssystem vorgesehen ist. Auf die Darstellung der inversen Relationen wurde wiederum verzichtet, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

Aus dem Bild 6.16 wird zudem deutlich, dass die Konzepte „Publikation“ und „Organisation“ Attribute besitzen. So verfügt eine Publikation über einen Titel, einen Autor und einen Jahr, in dem sie veröffentlicht wurde. Daneben existieren weitere Angaben für die Identifizierung von Dokumenten. Diese Angaben wurden in einer DIN-Norm [DIN84] standardisiert und werden daher im Wiki zur Beschreibung von Publikationen genutzt.

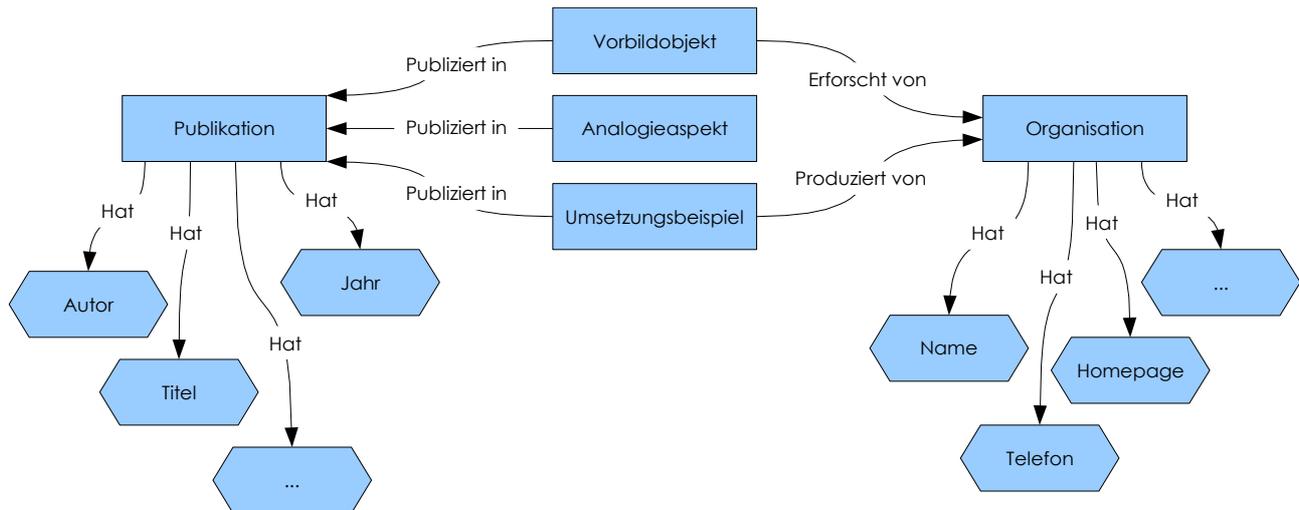


Bild 6.16: Relationen und Eigenschaften der Konzepte „Publikation“ und „Organisation“

Zur Spezifizierung der Eigenschaften der Klasse „Organisation“ werden im Wiki FOAF<sup>17</sup>-Angaben verwendet. Dabei handelt es sich um ein Projekt zur Entwicklung eines Internet-Standards, mit dem soziale Netzwerke, Organisationen und Menschen sowie und deren Beziehungen zueinander in eine maschinen-verständliche Form gebracht werden können [MB00]. Da es sich bei dem Format um ein RDF/OWL-Schema handelt, lässt es sich einfach in die Ontologie integrieren.

Jeder Artikel im Wiki hat einen Autor und ein Entstehungsdatum. Das Konzept des Unterstützungssystem sieht es nicht vor, die Schreibrechte der einzelnen Artikel zu beschränken. Bestehende Artikel können demnach durch andere Personen geändert werden. Es ist denkbar, die Informationen bezüglich Autoren und Änderungen ebenfalls in der Ontologie mit abzubilden. Da jedoch die meisten Wiki-Systeme bereits eine Versionierung von Artikeln beinhalten, in der erfasst wird, wer wann was und aus welchem Grund geändert hat, ist es nicht vorgesehen, diese Informationen auch in der ontologischen Struktur mit zu berücksichtigen.

Damit soll die Darstellung der Ontologie an dieser Stelle beendet werden. Tatsächlich ließe sich die ontologische Struktur beliebig ausbauen und vertiefen. Ein semantisches Wiki sollte jedoch nur soviel Struktur wie notwendig beinhalten. Strukturen bringen zwar Ordnung in ein Wiki. Sie stehen aber auch dem Wiki-Prinzip, das auf einem freien und unbeschränkten Editieren der Inhalte basiert, entgegen [Tho05]. Strukturen im Wiki sollten daher nur dort geschaffen werden, wo sie einen Zweck erfüllen. Sie lassen sich auch im Nachhinein hinzugefügen. Im Schrifttum wird darüber hinaus vorgeschlagen, die kontinuierliche Anpassung von Ontologien als Bestandteil ihres Entwicklungsprozesses aufzufassen [VPT+05]. Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden dargestellt werden, wie sich das Unterstützungssystem prototypisch umsetzen lässt. Es wird geschildert, welche Entwicklungsstand

semantische Wiki-Systeme gegenwärtig haben und wie der Produktentwickler mit einem solchen System arbeiten kann.

### 6.3.4 Anmerkungen zur prototypischen Umsetzung

Am Beginn der prototypischen Umsetzung des Unterstützungssystems steht die Auswahl einer geeigneten Wiki-Engine. Hierbei handelt es sich um die zugrunde liegende Software, die die Funktionalität für das Unterstützungssystem bereitstellt. Eine Recherche im Internet zeigte, dass dort eine Vielzahl von Wiki-Engines verfügbar sind. Da sie für unterschiedliche Anwendungsbereiche konzipiert wurden und auch verschiedene Nutzergruppen ansprechen wollen, unterscheiden sich die Softwaresysteme hinsichtlich ihrer Features<sup>18</sup>. So wird z. B. die Wiki-Software *TWiki*<sup>19</sup> vor allem in Intranets von Unternehmen eingesetzt. Sie verfügt über eine gute Nutzerverwaltung und lässt sich durch zahlreiche Plugins z. B. im Bereich des Projektmanagements erweitern. Die Wiki-Engine *DokuWiki*<sup>20</sup> hingegen ist auf das Erstellen von Dokumentationen spezialisiert und wird bspw. bei Softwareentwicklungsprojekten eingesetzt. Sehr bekannt ist auch die Wiki-Software *MediaWiki*<sup>21</sup>, die ursprünglich für die freie Enzyklopädie Wikipedia entwickelt wurde, aber zwischenzeitlich auch für eine Vielzahl anderer Projekte eingesetzt wird.

Die Auswahl der in Frage kommenden Wiki-Engines schränkt sich stark ein, wenn von der Software die Unterstützung von Semantik gefordert wird. Gegenwärtig sind etwa 20 Implementierungen von semantischen Wikis bekannt<sup>22</sup>. Zu diesen Systemen zählen unter anderem *IkeWiki*<sup>23</sup>, *Semantic MediaWiki*<sup>24</sup>, *Rhizome*<sup>25</sup>, *Makna*<sup>26</sup>, *Platypus Wiki*<sup>27</sup> und *WikiSAR*<sup>28</sup>. Semantische Wikis stellen einen Kompromiss zwischen dem inhalt-orientierten Ansatz herkömmlicher Wiki-Software und dem struktur-orientierten Ansatz von Content-Management-Systemen (CMS) dar. Die genannten Wiki-Systeme lassen sich zwischen diesen beiden „Extremen“ einordnen. Das Bild 6.17 verdeutlicht dies grafisch. Die Einordnung basiert auf Informationen, die auf den Webseiten der jeweiligen Wiki-Software zu finden waren.

---

18 Eine Zusammenstellung bekannter Wiki-Systeme und ihrer Features ist z. B. unter <http://www.wikimatrix.org> oder <http://moinmoin.wikiwikiweb.de/WikiEngineComparison> zu finden.

19 <http://www.twiki.org>

20 <http://wiki.splitbrain.org>

21 <http://www.mediawiki.org>

22 Die Seite [http://wiki.ontoworld.org/wiki/Semantic\\_Wiki\\_State\\_Of\\_The\\_Art](http://wiki.ontoworld.org/wiki/Semantic_Wiki_State_Of_The_Art) enthält eine Liste von Wiki-Software, die Semantik unterstützen.

23 <http://ikewiki.salzburgresearch.at>

24 [http://wiki.ontoworld.org/index.php/Semantic\\_MediaWiki](http://wiki.ontoworld.org/index.php/Semantic_MediaWiki)

25 <http://www.liminalzone.org/Rhizome>

26 <http://www.apps.ag-nbi.de/makna/>

27 <http://platypuswiki.sourceforge.net>

28 <http://wiki.navigable.info/HomePage>

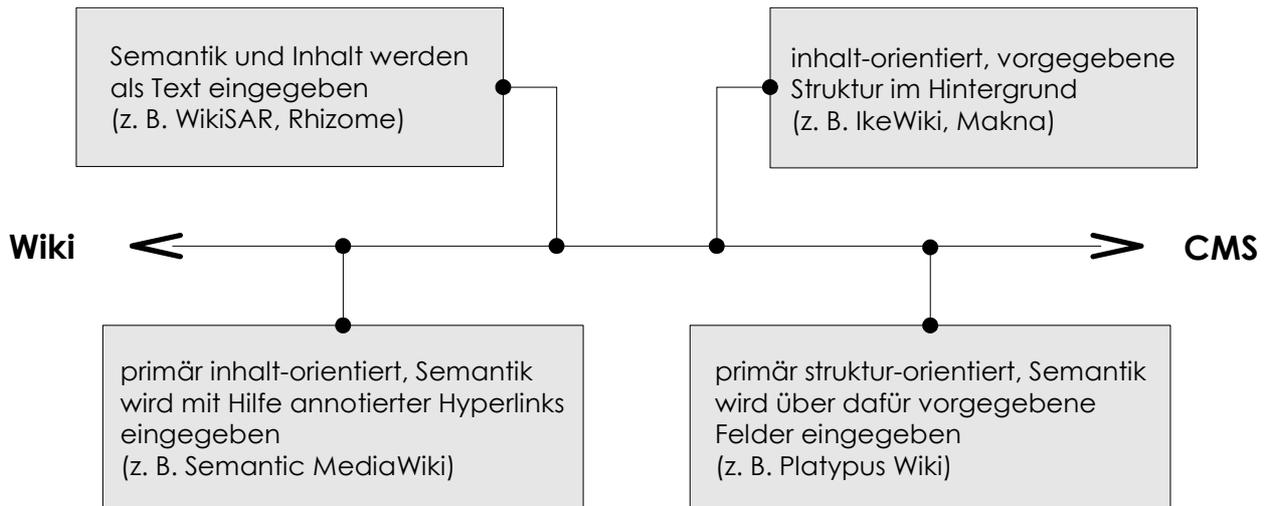


Bild 6.17: Einordnung semantischer Wiki-Software

Wie das Bild 6.17 zeigt, nutzen die einzelnen Wiki-Systeme Semantik in unterschiedlicher Art und Weise. Da die Systeme, wie oben bereits erwähnt, unterschiedliche Ziele verfolgen und sich an verschiedene Nutzergruppen richten, wird auch die Semantik in den Systemen unterschiedlich eingesetzt. So wird beim *Semantic MediaWiki* das Konzept einer relativ „weichen“ Implementierung verfolgt. Der Nutzer kann hier in jedem Artikel neue Relationen und Attribute beliebig definieren. Sie sind nicht wie in anderen Systemen an bestimmte Klassen gebunden. Wesentlich strenger ist die Semantik im *Platypus Wiki* implementiert. Dieses System richtet sich an Nutzer, die die Möglichkeiten der semantischen Informationsverarbeitung in einem Wiki weitestgehend ausschöpfen wollen. Ein Ziel der Entwickler von *Platypus Wiki* ist es, die Ideen des Semantischen Webs auf ein Wiki übertragen und durch die intensive Nutzung von Metadaten, die Inhalte der Webseiten maschinenverständlich aufzubereiten. Da in *Platypus Wiki* die Semantik von vordergründigem Interesse ist, erfolgt die Dateneingabe hier über vordefinierte Felder.

Neben den oben aufgeführten Ansätzen gibt es weitere Wiki-Systeme, die sich „im Grenzbereich zur Semantik“ bewegen. Hierzu zählen z. B. *PMWiki*<sup>29</sup> und das bereits obengenannte *TWiki*. In diesen Wiki-Systemen ist es z. B. möglich, Artikel mit Stichworten (*tags*) zu versehen und diese dann als Ordnungs- und Filterkriterium zu verwenden. Die *tags* sind so gesehen mit Klassen vergleichbar. Des Weiteren können in den Artikeln Variablen definiert werden, denen bestimmte Werte zugeordnet werden können. Aus Sicht der Semantik entsprechen sie den Attributen. Darüber hinaus werden für jeden Artikel automatisch so genannte *backlinks* generiert, die nicht anderes als inverse Relationen darstellen. Da diesen Wiki-Systemen jedoch ein wesentliches Hauptmerkmal semantischer Wikis – nämlich die Möglichkeit zur Definition *kommentierter* Relationen – fehlt, werden sie im Allgemeinen nicht zu den semantischen Wiki gezählt.

29 <http://wiki.navigable.info/HomePage>

Semantische Wiki-Software ist, wie bereits erwähnt wurde, zur Zeit noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Auch wenn sich mit den Systemen bereits relativ gut arbeiten lässt, darf der Nutzer keine ausgereifte Software erwarten, die allen seinen Anforderungen gerecht wird. Die Systeme wurden – wie oben dargestellt wurde – für unterschiedliche Anwendungsfälle konzipiert und richten sich an verschiedene Nutzergruppen. Vor diesem Hintergrund kann es vorkommen, dass ein Nutzer, der auf dem Gebiet der Semantik nur über Grundkenntnisse verfügt, eine Wiki-Software, mit der sich ontologische Strukturen gut modellieren lassen, als anwenderunfreundlich empfindet. Auf der anderen Seite mag er bei einem Wiki-System, bei dem die Semantik in leicht verständlicher Weise angegeben werden kann, bestimmte Funktionalitäten vermissen.

Bei den Anwendern des hier diskutierten Unterstützungssystems können keine Kenntnisse über den Aufbau und die Beschreibung von Ontologie vorausgesetzt werden. Dies ist bei der Auswahl einer geeigneten Wiki-Software zu berücksichtigen. Die Bedienung des Wiki-Systems – vor allem der Umgang mit der Semantik – sollte leicht erlernbar sein. Es ist zudem von Vorteil, eine relativ weit verbreitete Software zu verwenden, da hier die Chance besteht, dass der ein oder andere Nutzer sie bereits kennt.

Im Folgenden soll dargestellt werden, wie das Unterstützungssystem gestaltet werden könnte und welche Möglichkeiten zur Recherche hieraus resultieren. Die Darstellung erfolgt dabei am Beispiel von *Semantic MediaWiki*. Der Entscheidung für dieses System lag kein detailliertes Benchmarking zugrunde. Die Software wurde aus pragmatischen Gründen gewählt, da sie auf der relativ weit verbreiteten Wiki-Engine *MediaWiki* aufsetzt und nicht zuletzt auch deshalb, weil auf dem zur Verfügung stehenden Computer die für eine Installation notwendigen Systemvoraussetzungen gegeben waren. Eine solche Entscheidungsgrundlage ist zwar dem hier verfolgten Zweck, die Möglichkeiten eines semantischen Wikis prinzipiell darzustellen, angemessen, der Auswahl der „finalen“ Wiki-Software für das Unterstützungssystem sollte jedoch eine weiterführende Bewertung vorausgehen.

### 6.3.5 Prototypische Umsetzung mit *Semantic MediaWiki*

Die Beschreibung der prototypischen Umsetzung des Unterstützungssystems für die Bionik ist im wesentlichen eine Darstellung der ihm zugrunde liegenden Software. Dabei ist jedoch festzustellen, dass die zahlreichen Funktionen von *MediaWiki* an dieser Stelle nicht in vollen Umfang beleuchtet werden können. Die nachfolgenden Ausführungen geben daher nur einen kleinen Einblick in den Funktionsumfang und vermitteln einen Eindruck von der Software. Für weiterführende Informationen sei der Leser auf die entsprechende Softwaredokumentation<sup>30</sup> verwiesen. Zudem ist im Internet unter

---

<sup>30</sup> Die Dokumentation für *MediaWiki* ist online unter <http://www.mediawiki.org> verfügbar. Die Funktionalitäten der Erweiterung „*Semantic MediaWiki*“ sind unter [http://www.ontoworld.org/wiki/Semantic\\_MediaWiki](http://www.ontoworld.org/wiki/Semantic_MediaWiki) dokumentiert.

<http://www.bionik-wiki.de> eine prototypische Umsetzung des Unterstützungssystems zu finden. Der Leser kann hier einen Eindruck vom gegenwärtigen Entwicklungsstand des Wiki-Projektes gewinnen.

Bei Semantic MediaWiki handelt es sich – wie bereits erwähnt – um eine Erweiterung der Wiki-Engine MediaWiki. Es ist eines von vielen Zusatzmodulen, mit denen sich die Funktionalität von MediaWiki erweitern lässt. Für die prototypische Umsetzung des Unterstützungssystem wurde zunächst MediaWiki (Version 1.9.2) installiert und danach Semantic MediaWiki (Version 0.6) in das entsprechende Verzeichnis für die Erweiterungen entpackt. Die Funktionalität für die Semantik steht dem Nutzer daraufhin sofort – und ohne dass das System oder die Software neu gestartet werden muss – zur Verfügung.

In MediaWiki werden sowohl der Artikeltext als auch die Metadaten für die Semantik über einen gemeinsamen Editierbereich eingegeben. Der Wechsel in den Editier-Modus erfolgt über den Link „Bearbeiten“, der über dem Artikel zu finden ist. Hier hat der Anwender hier die Möglichkeit, Text und Bilder einzufügen, den Artikel zu formatieren (z. B. Überschriften) und Metadaten für die Semantik hinzuzufügen. Um z. B. in einem Artikel die Relation „Basiert auf Prinzip“ zur Seite „Dynamisierung“ zu definieren, wird im Artikeltext `[[Basiert auf Prinzip::Dynamisierung]]` geschrieben. Für die Definition eines Attributes erfolgt dies analog. Die Verknüpfung von Attributsbezeichnung und Wert erfolgt jedoch nicht mit „:“, sondern durch die Zeichenkette „:=“. So lässt sich z. B. einer Publikation durch die Eingabe von `[[hat Erscheinungsjahr:=1999]]` ein Erscheinungsjahr zuweisen.

Das Bild 6.18 zeigt beispielhaft den Aufbau einer Seite im Unterstützungssystem. Neben dem eigentlichen Artikel, der zentral angeordnet ist, sind die Bereiche *Menü*, *backlinks*, *factbox* und *Kategorie* für den Aufbau charakteristisch und sollen daher im Folgenden beschrieben werden.

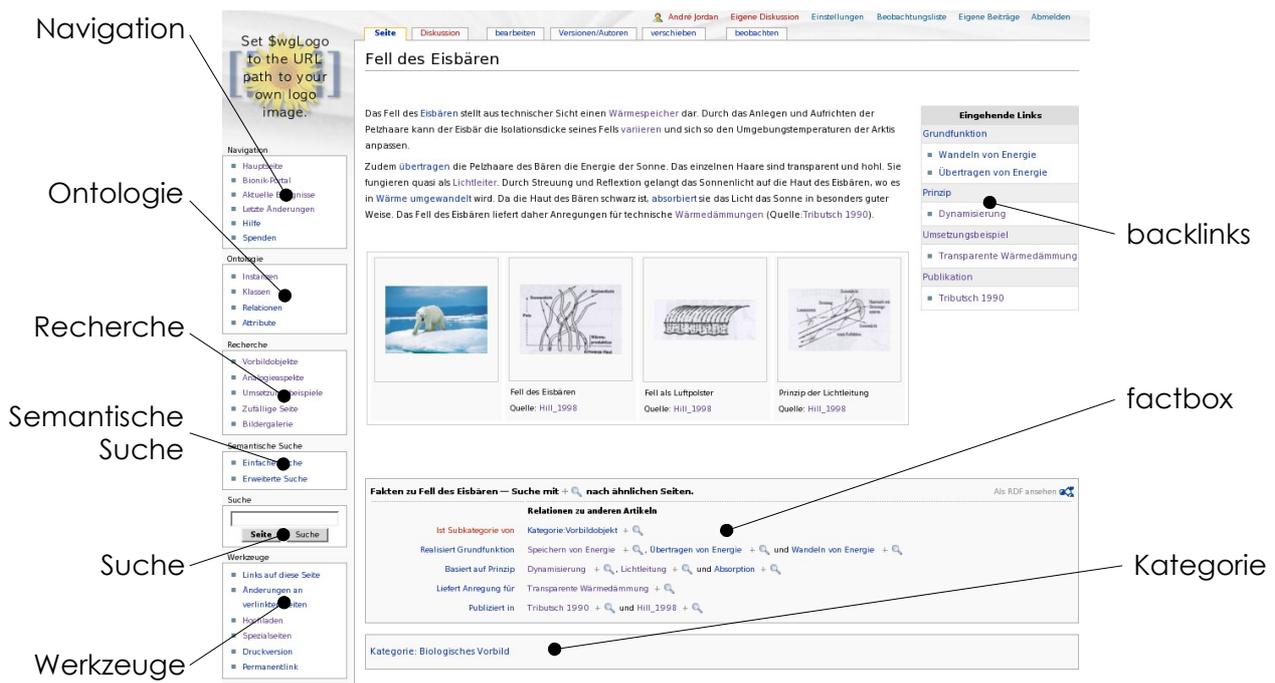


Bild 6.18: Aufbau eines Artikels im Unterstützungssystem

Wie bei vielen Webseiten üblich, ist der Navigationsbereich in MediaWiki links angeordnet. Das Menü ist in mehrere Teile gegliedert. Über den ersten Teil *Navigation* hat der Nutzer stets Zugriff auf Seiten, die allgemeine Informationen zum Wiki-Projekt beinhalten. Hierzu gehören z. B. die Hauptseite, eine Übersicht der letzten Änderungen an den Artikeln und eine Hilfe-Seite. Unter dem ersten Teil befindet sich der Bereich *Ontologie*, über den der Nutzer Zugang zu allen im System definierten Klassen, Relationen und Attributen sowie zu den bereits vorhandenen Instanzen (Artikeln) erhält.

Die beiden nachfolgenden Menübereiche werden vom Anwender voraussichtlich am häufigsten genutzt werden, bieten sie ihm doch die Möglichkeit zur Recherche und zur semantischen Suche. Das Menü *Recherche* gewährleistet dem Nutzer einen problemorientierten Einstieg in das System. Je nach Bedarf kann er auf die im System definierten Vorbildobjekte, die Analogieaspkete und die Umsetzungsbeispiele (die „Ankerpunkte“ in der ontologischen Struktur) zugreifen. Hat er noch keine konkreten Vorstellungen, kann er sich eine vom System zufällig ausgewählte Seite anzeigen lassen. Er kann sich hiervon inspirieren lassen und prüfen, inwiefern die Darstellungen im Artikel für die Lösung seiner Problemstellung relevant sind.

Der Inspiration dient auch die Bildergalerie (Bild 6.19), auf die der Nutzer ebenfalls über das Menü *Recherche* zugreifen kann. Hierbei handelt es sich um eine automatisch generierte Zusammenstellung aller im Wiki gespeicherten Bilder. In der Galerie werden sie dem Nutzer in verkleinerter Größe präsentiert. Entdeckt der Anwender ein Bild, das sein Interesse weckt, kann er es anklicken. Dadurch wird das Bild zum einen in voller Größe dargestellt und zum anderen erhält der Anwender Informati-

on darüber, von welchen Artikeln das Bild verwendet wird. Der Nutzer kann diese Artikel aufrufen und prüfen, ob sie Ansätze zur Lösung seines Problems beinhalten.

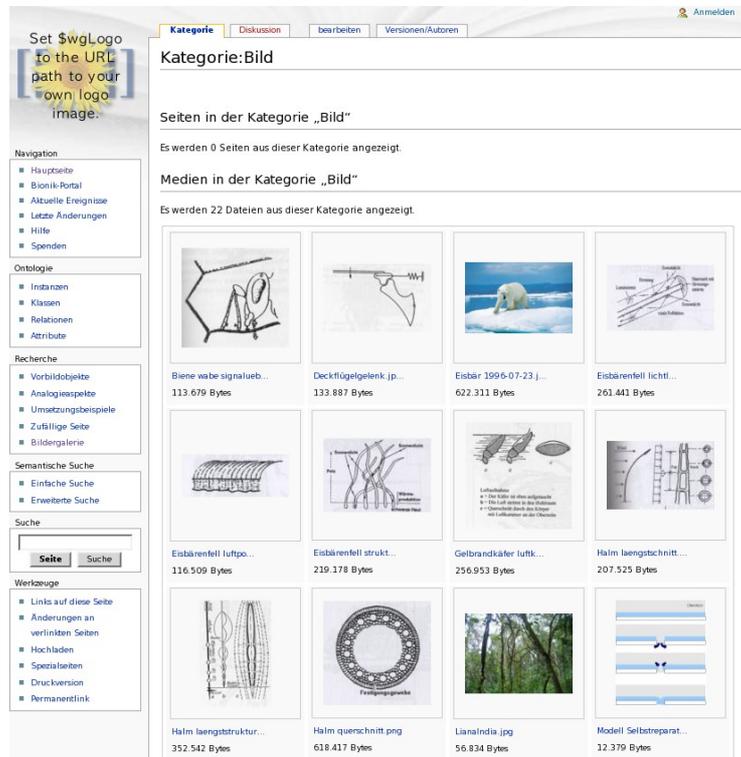


Bild 6.19: Auszug aus der Bildergalerie im Unterstützungssystem

Das Menüfeld *Semantische Suche* enthält die zwei Einträge *Einfache Suche* und *Erweiterte Suche*. Der Menüpunkt *Einfache Suche* führt den Produktentwickler zu einem Formular mit verschiedenen Eingabefeldern, durch die er ein RDF-Statement in der Form eines Tripels formulieren kann. Trägt er z. B., wie im Bild 6.20 gezeigt, im Feld für die Relationen „Publiziert in“ und im Eingabefeld für das Objekt die Bezeichnung einer bestimmten Publikation (im Bild 6.20 „Hill 1998“) ein, listet ihm das System alle Artikel (d. h. alle Vorbildobjekte, Analogieaspekte und Umsetzungsbeispiele) auf, für die eine solche Relation definiert wurde. Gibt er hingegen im Eingabefeld für das Subjekt einen bestimmten Artikel vor, zeigt ihm das System alle Objekte, die mit diesem Artikel zusammenhängen, und die dazugehörigen Relationen. In analoger Weise kann der Anwender auch die Bezeichnungen von Attributen oder bestimmte Attributwerte als Suchkriterium angeben.

Bild 6.20: Aufbau der Seite „Einfache semantische Suche“

Der Menüpunkt *Erweiterte Suche* führt den Anwender ebenfalls zu einem Formular. Diese besitzt jedoch nur ein Eingabefeld, das einen mehrzeiligen Eintrag erlaubt. Hier kann der Nutzer mit Hilfe einer speziellen Abfragesprache Suchanfragen formulieren, die über die reine Beschreibung eines RDF-Tripels hinausgehen. Im Gegensatz zu der oben beschriebenen einfachen Suche ist es bei der erweiterten Suche z. B. auch möglich, Abfragen durch UND-Verknüpfungen zu verbinden und sie zu verschachteln. So würde eine Suchanfrage nach allen Vorbildobjekten, für die als Grundfunktionen das Speichern und Wandeln von Energie angegeben wurde und die auf dem Prinzip der Dynamisierung basieren und die darüber hinaus in einer Publikation von TRIBUTSCH beschrieben wurden, wie folgt formuliert werden:

```
[[Kategorie:Vorbildobjekt]]
[[Realisiert Grundfunktion::Speichern von Energie]]
[[Realisiert Grundfunktion::Wandeln von Energie]]
[[Basiert auf Prinzip::Dynamisierung]]
[[Publiziert in::<q>[[Kategorie:Publikation]] [[Hat Autor:=Tributsch]]</q>]]
```

Der Suchmechanismus ist als ein schrittweiser Filterprozess zu verstehen. Im ersten Schritt werden vom System all die Artikel herausgegriffen, die der Kategorie „Vorbildobjekt“ angehören. Von diesen Artikeln bleiben im nächsten Schritt all jene übrig, für die eine Relation mit dem Namen „Realisiert Grundfunktion“ zum Analogieaspekt „Speichern von Energie“ definiert wurde. Mit jedem weiteren Filterkriterium, das der Suchanfrage hinzugefügt wird, wird die Liste der Artikel, die vom System ausgegeben wird, verkleinert.

Die nachfolgenden Menübereiche *Suche* und *Werkzeuge* werden von MediaWiki standardmäßig definiert. Mit Hilfe der Suchfunktion kann der Anwender Artikel finden, deren Titel mit dem Suchbegriff (vollständig) übereinstimmt. Existiert ein solcher Artikel nicht, sucht MediaWiki den Begriff im

gesamten System. Dem Nutzer werden dann auch solche Seiten angezeigt, wo der Suchbegriff ein Teil des Titels ist, und solche, bei denen er im Inhalt vorkommt.

Das Menüfeld *Werkzeuge* ist dynamisch angelegt. Es ändert sich in Abhängigkeit von den Möglichkeiten der Interaktion, die sinnvoll sind, und davon, über welche Rechte der Nutzer verfügt. Dem Anwender ist es hier z. B. möglich, Dateien (z. B. Bilder oder Videosequenzen) „hochzuladen“, sich die Änderungen an Seiten, die mit dem aktuellen Artikel verlinkt sind, auflisten zu lassen oder den Artikel in einer für den Ausdruck geeigneten Version anzeigen lassen. Zudem erhält er Zugriff auf die so genannten „Spezialseiten“ und kann sich z. B. statistische Informationen zum Wiki anzeigen lassen oder auf die Benutzerrechteverwaltung zugreifen.

Neben den obengenannten Menübereichen bietet das Unterstützungssystem dem Nutzer noch weiteren Möglichkeiten der Navigation. So wird im Bild 6.18 (S. 157) im rechten Bereich ein Kasten dargestellt, der über die eingehenden Links informiert. Diese „Infobox“ ist in Bild 6.21 vergrößert dargestellt. In ihr werden vom System automatisch diejenigen Artikel aufgelistet, in denen eine Relation auf den gegenwärtig angezeigten Artikel definiert wurde. Der Anwender erhält so einen direkten Zugriff auf Seiten, in denen er weiterführenden Informationen erwarten kann.

Eingehende Links
Grundfunktion
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Wandeln von Energie</a></li> <li>■ <a href="#">Übertragen von Energie</a></li> </ul>
Prinzip
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Dynamisierung</a></li> </ul>
Umsetzungsbeispiel
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Transparente Wärmedämmung</a></li> </ul>
Publikation
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Tributsch 1990</a></li> </ul>

Bild 6.21: Infobox mit eingehenden Links

Die Darstellung des Kastens basiert auf einer Vorlage. Vorlagen sind in MediaWiki Seiten, die mit Hilfe der Syntax `{{Name der Vorlage}}` in andere Artikel eingebunden werden können. An der entsprechenden Stelle wird bei jedem Seitenaufruf der aktuelle Inhalt der Vorlage angezeigt. Die Vorlage, die zur Darstellung der eingehenden Links definiert wurde, verwendet die bereits oben erwähnte Abfragesprache von Semantic MediaWiki. Da die hier verwendeten Abfragen von vielen Artikeln im Wiki genutzt werden und zudem etwas komplexer sind, bietet es sich an, sie mit Hilfe einer Vorlage vor dem „normalen“ Nutzer zu verstecken.

Für jeden Artikel, in dem mindestens ein Attribut oder eine Relation zu einer anderen Seite definiert wurde, generiert Semantic MediaWiki eine so genannte *factbox* (Bild 6.22) und stellt sie unter dem Artikeltext dar. Bei dieser *factbox* handelt es sich um eine Zusammenstellung aller semantischen An-

notationen, die im Artikel definiert wurden. Im Gegensatz zur Infobox oben werden in der factbox die *ausgehenden* Links zu anderen Artikeln dargestellt. Ein solcher Überblick ist sinnvoll, da die Annotationen im Artikeltext für den Leser nicht ersichtlich sind. So werden die im Artikel definierten Attribute im Text nicht gesondert gekennzeichnet. Links zu anderen Seiten werden zwar im Artikeltext farblich hervorgehoben, doch die Art der Bezeichnung der Relation geht hieraus nicht hervor.



Bild 6.22: Aufbau der factbox in Semantic MediaWiki

Die Angaben in der factbox sind als Links ausgeführt, so dass der Anwender schnell zu den jeweiligen Artikeln „springen“ kann. Über das Lupen-Icon gelangt er zudem zur einfachen semantischen Suche. Bei einem Klick auf das Icon übernimmt Semantic MediaWiki den Namen der Relation und die Bezeichnung des Objektes in die entsprechenden Formularfelder, startet die Suche und zeigt dem Nutzer an, in welchen Artikeln diese Relation noch definieren werden.

Unter der factbox listet das System auf, welchen Kategorien der angezeigte Artikel zugeordnet wurde. Das Konzept, Kategorien als Ordnungskriterium zu verwenden, ist in MediaWiki standardmäßig (also auch ohne die Erweiterung „Semantic MediaWiki“) implementiert. Kategorien haben in MediaWiki eine hierarchische Struktur. Ein Artikel kann auch mehreren Kategorien zugeordnet werden. Die Zuordnung erfolgt, indem im Artikeltext ein entsprechender Eintrag (z. B. [[Kategorie:Vorbildobjekt]]) vorgenommen wird. MediaWiki interpretiert dies und nimmt automatisch eine entsprechende Zuordnung vor.

Semantic MediaWiki greift dieses Konzept der Kategorien auf. Die Kategorien entsprechen hier den Klassen in der ontologischen Struktur. Es ist anzumerken, dass es in Semantic MediaWiki bislang nicht möglich ist, einer Klasse Relationen und Attribute zu zuweisen, die dann auch für die jeweiligen Instanzen dieser Klasse gültig sind. So ist es z. B. nicht möglich, dem System mitzuteilen, dass alle Instanzen der Klasse „Publikation“ ein Attribut „Autor“ besitzen sollen. Soll ein Artikel der Klasse „Publikation“ zugewiesen werden, so muss der Anwender zunächst im Artikeltext [[Kategorie:Publikation]] notieren, um dem System die Klasse mitzuteilen, und dann die gewünschten Relationen wie [[Hat Autor:= ... ]], [[Hat Erscheinungsdatum:= ... ]], [[Hat Titel:= ... ]] etc. definieren.

Die von Semantic MediaWiki verfolgte „weiche“ Implementierung semantischer Strukturen hat Vor- und Nachteile. Einerseits bietet sich so die Möglichkeit, die ontologische Struktur parallel zu den Inhalten des Wikis aufzubauen. Dies ist vor allem denn sinnvoll, wenn ein semantisches Wiki aufgesetzt werden soll, aber noch nicht vollständig klar ist, wie die ontologische Struktur aussehen soll. Durch die „weiche“ Implementierung sind Änderungen der Struktur im laufenden Betrieb problemlos möglich. Andererseits verhindert dieser Ansatz eine Konsistenzprüfung. Da Semantic MediaWiki keine ontologische Struktur vorgibt, kann das System nicht prüfen, welche Annotationen richtig und welche falsch sind. So ist es jedem Anwender problemlos möglich, neue Relationen und Attribute zu erstellen und die ontologische Struktur zu erweitern. Hierin verbirgt sich zum einen die Gefahr eines unkontrollierten Wachstums der Struktur, zum anderen wird der Anwender nicht daran gehindert, einen Artikel mit einer Relation versehen, die aus logischen Gesichtspunkten keinen Sinn macht. Semantic MediaWiki verfügt über keine Funktionen, die Überprüfungen dieser Art erlauben und den Anwender auf Inkonsistenzen hinweisen.

Es gibt Überlegungen, Semantic MediaWiki mit einem externen Programm zum fallbasierten Schließen zu kombinieren, um Inkonsistenzen in der ontologischen Struktur aufzeigen und Artikel automatisch klassifizieren zu können [VK06]. Die Softwareimplementierung, die hierzu momentan zur Verfügung steht, weist die prinzipielle Machbarkeit des Ansatzes nach. Da sich die Implementierung jedoch noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindet, ist es bislang nicht angedacht, sie im Rahmen des Unterstützungssystems zu nutzen.

Wie bereits angesprochen wurde, soll das Unterstützungssystem nicht nur die Recherche unterstützen, sondern auch den Dialog zwischen Experten erleichtern. Eine Möglichkeit, dies im Unterstützungssystem zu realisieren, stellen Diskussionsforen dar. In MediaWiki ist jeder Artikel mit einer Diskussionsseite verbunden. Hier können z. B. unklare Formulierungen im Artikel oder offene Fragen diskutiert werden. Die Diskussionsseite kann so dazu beitragen, die Qualität des Artikels zu verbessern.

Der Dialog in Diskussionsforen ist jedoch relativ unpersönlich und erfolgt auf einer öffentlichen Plattform. Eine Kommunikation in diesem Rahmen ist in vielen Fällen nicht ideal. Besonders bei Detailfragen ist der Dialog auf der persönlichen Ebene den Diskussionsbeiträgen in Foren zu bevorzugen. Der persönliche Kontakt zu Biologen wird für den Produktentwickler auch dann wichtig, wenn zur Erläuterung einer Problemstellung Informationen preisgegeben werden müssen, die zum Know-how des Unternehmens gehören. Aus diesem Grund wurde im Unterstützungssystem auch eine Möglichkeit vorgesehen, mit den Experten direkt in Kontakt zu treten. Für jede zu präsentierende Organisation wird daher im MediaWiki ein Artikel angelegt und der Kategorie „Organisation“ zu geordnet. Dieser Artikel enthält neben einer Beschreibung des Dienstleistungsangebots auch die ent-

sprechenden Kontaktinformationen. Die Klasse „Organisation“ ist – wie in Kapitel 6.3.3 beschrieben – über entsprechende Relationen mit den Klassen „Vorbildobjekt“ und „Umsetzungsbeispiel“ verbunden. Der Produktentwickler wird so in die Lage versetzt, ausgehend von Artikeln dieser Klassen auf die Kontaktdaten der entsprechenden Experten zuzugreifen und seine Problemstellung mit ihnen vertraulich zu diskutieren.

### 6.3.6 Zusammenfassung und Diskussion

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein Unterstützungssystem für die Bionik skizziert, das der Produktentwickler zur Recherche im Rahmen der Lösungsfindung nutzen kann und das den Dialog zwischen den Experten fördert. Es wurde als offenes und kontinuierlich wachsendes System konzipiert. Als Werkzeug für die Recherche knüpft es an bestehende Ansätze zur methodischen Unterstützung der Bionik an und erweitert diese. Die Grundlage des Unterstützungssystems bildet ein semantisches Wiki, mit dem wesentliche Nachteile bestehender Ansätze überwunden werden können.

Die Ausführungen in diesem Kapitel machten deutlich, dass die derzeit verfügbaren Ansätze zur Unterstützung des bionischen Arbeitens wie die Kataloge biologischer Konstruktionen [Hil98a; Nac05], die Assoziationslisten [Gra04] oder die Grundprinzipien biologischer Systeme [Nac98b] weitestgehend isoliert voneinander stehen. Sie haben zudem meist einen statischen Charakter. So existieren z. B. die Kataloge biologischer Konstruktionen bislang lediglich in Buchform und lassen sich daher nur vergleichsweise schwer erweitern. Ähnliches gilt auch für die Assoziationslisten. Darüber hinaus können in einem Buch Informationen nur in Form von Texten und Bildern dargestellt werden. Mit dem vorgestellten Unterstützungssystem lassen sich auch andere Repräsentationsformen wie z. B. Animationen für die Darstellung der Informationen nutzen.

Verbesserungen ergeben sich auch bei der Recherche selbst. So ist in einem Buch die Möglichkeit, nach bestimmten Begriffen zu suchen, begrenzt. Mit dem Unterstützungssystem hingegen lassen sich aufgrund der digitalen Datenverwaltung erweiterte Suchfunktionen implementieren. Das System besitzt nicht nur eine Schlagwortsuche, mit der der Anwender die Artikel nach beliebigen Begriffen durchsuchen kann, durch die Verknüpfung der Informationen in der ontologischen Struktur kann sich der Nutzer zudem Schritt für Schritt zu den für ihn relevanten Informationen „durchhangeln“.

Mit Hilfe der Ontologie gelingt es außerdem, die bislang isolierten Ansätze zusammenzufügen und miteinander zu verknüpfen. Die ontologische Struktur ermöglicht es dem Produktentwickler, gleichzeitig in der Breite wie auch in der Tiefe zu recherchieren. Mit den einzelnen Klassen bietet sie eine Vielzahl von „Einstiegspunkten“ für die Recherche. Darüber hinaus erlauben die Relationen, die die unterschiedlichen Themengebiete miteinander verknüpfen, dem Anwender ein gezieltes Wechseln zu anderen relevanten Aspekten. Für das Unterstützungssystem ergeben sich hieraus eine Vielzahl

möglicher Nutzungsszenarien. So kann z. B. der Produktentwickler, der eine erste Analogie zwischen der antizipierten technischen Lösung und einem biologischem System gefunden hat, im System nach weiterführenden Informationen suchen und diese zum Aufbau eines ganzheitlichen Analogiebild (vgl. Kapitel 5.2.2) nutzen. Auf der anderen Seite bietet das System auch die Möglichkeit, von der technischen Seite her „einzusteigen“. Auf Fragestellungen wie „In welcher Weise realisiert die Natur das Prinzip der Dynamisierung im Hinblick auf die Wärmedämmung?“ wird das Unterstützungssystem Informationen zu den entsprechenden biologischen Vorbildobjekten liefern. Des Weiteren kann der Produktentwickler anhand bestehender technischer Lösungen erkennen, wie sich das Anregungspotential der natürlichen Vorbilder für die Entwicklung technischer Produkte nutzen lässt. Die Beispiele zeigen ihm nicht nur den Weg eines erfolgreichen Natur-Technik-Transfers, unter Umständen können sie auch Ansätze beinhalten, die der Produktentwickler zur Lösung seiner Problemstellung aufgreifen kann.

Das „freie Bewegen“ zwischen den verschiedenen Facetten eines Themas und die daraus resultierende Flexibilität bei der Recherche basiert in einem hohen Maß auf der Ontologie, die dem Unterstützungssystem zugrunde liegt. Der Aufbau der ontologischen Struktur erfolgte im Wesentlichen unter logischen Gesichtspunkten. In der Ontologie wurden vorrangig solche Aspekte miteinander verknüpft, für die im Schrifttum der Bionik Beispiele einer erfolgreichen Natur-Technik-Übertragung zu finden sind. Es kann nicht angenommen werden, dass die entstandene Struktur ohne Mängel ist. Bislang existieren keine Erfahrungen, die belegen, dass ein Unterstützungssystem für die Bionik, das auf der vorgeschlagenen Ontologie basiert, ein effizientes Recherchieren ermöglicht. Ein Nachweis ließe sich nur erbringen, wenn das vorgeschlagene Unterstützungssystem realisiert und in der Praxis getestet würde. Der vorliegende Prototyp genügt für diese Zwecke nicht, da er bislang kaum Artikel mit Inhalten enthält. Vor diesem Hintergrund ist das in dieser Arbeit vorgestellte System und die ihm zugrunde liegende Ontologie als Grundlage für weitere Diskussionen zu verstehen.

Bei der prototypischen Umsetzung wurde deutlich, dass eine Realisierung des Konzeptes derzeit nur eingeschränkt erfolgen kann. Zwar basiert das Unterstützungssystem im Wesentlichen auf bekannten Ansätzen, doch die für eine Realisierung notwendigen Technologien und Werkzeuge zur semantischen Wissensrepräsentation befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Es verwundert daher nicht, dass die gegenwärtig verfügbaren Systeme längst nicht alle Möglichkeiten der Semantik ausschöpfen. So ist z. B. im Unterstützungssystem bislang nicht möglich, synonyme Begriffe für die Suche zu verwenden. Zwar ließen sich theoretisch Synonyme innerhalb der ontologischen Struktur definieren, doch besser wäre es, das Unterstützungssystem mit einem *semiotischen Thesaurus*, wie er z. B. von UMSTÄTTER [Ums99] vorgeschlagen wird, zu kombinieren. Bei dieser Art von Thesaurus wird jedes Wortfeld von allen anderen verwandten Wortfeldern durch Hierarchie, Assoziation, Hom-

onymie, Synonymie, etc. umrissen. UMSTÄTTER konstatiert, dass Begriffe – im Gegensatz zu Namen – nichts mit der natürlichen Sprache zu tun haben. „*Der Unterschied zwischen Benennung und Begriff darin liegt, dass die Benennung das Wort im Thesaurus ist, während sich seine Begrifflichkeit aus der Vernetzung ergibt*“ [Ums99, S. 6]. Dies führt zu einer unscharfen Abgrenzung von Begriffen und letztlich zu einer Thesaurusstruktur, die vergleichbar ist mit der Repräsentation von Bedeutungswissen im menschlichen Gehirn. Es ist einsehbar, dass ein semiotischer Thesaurus eine sinnvolle Ergänzung für das Unterstützungssystem darstellt. Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, in welcher Weise er in die Ontologie eingebunden werden kann.

Es wurde bereits früher diskutiert, dass das Unterstützungssystem durch die Mitarbeit vieler Experten entstehen soll. Einen wichtigen Punkt stellt in diesem Zusammenhang die Motivation der Experten dar, an der Gestaltung des Systems mitzuwirken. Ein möglicher Ansatz ist es, das Prinzip „Geben und Nehmen“ nutzen, das im Internet in vielen Foren – auch im Hinblick auf fachliche Themen<sup>31</sup> – erfolgreich praktiziert wird. Einschränkend ist hierzu jedoch festzustellen, dass im Unterschied zu den meisten Fachforen die Nutzer des Unterstützungssystems eine inhomogene Gruppe bilden dürften. Es wird Personen geben, die vorrangig Informationen bereitstellen (Biologen), und solche, die in erster Linie Informationen abrufen (Produktentwickler). Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, ob das Prinzip „Geben und Nehmen“ für das Unterstützungssystem geeignet ist oder ob ein zusätzliches Anreizsystem geschaffen werden muss. Generell lässt sich der Zugriff auf ein Wiki beschränken. So ist es z. B. denkbar, die Nutzung des Unterstützungssystems kostenpflichtig zu gestalten und nur registrierten Besuchern zu gestatten. Die Beiträge der Nutzer könnten über ein Bonus-System verteilt werden und an die Personen zurückfließen, die Inhalte in das System einstellen und so aktiv an der Gestaltung des Systems mitwirken. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass ein Wiki oft besser als vermutet funktioniert. Die Entscheidung, die Zugriffsrechte zu beschränken, sollte daher sorgfältig bedacht werden [Tho05].

---

31 Ein solches Fachforum ist z. B. <http://www.cad.de>, das sich mit Themen wie CAD, CAM und PLM beschäftigt.

*Letztlich muss sich ein Produkt verkaufen lassen.*

*Dies gilt auch für bionische Produkte.*

*RUDOLF BANNASCH*

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Seit jeher ist die Menschheit bestrebt, aus dem Wissen und den Vorstellungen, die sie im Verlaufe der Zeit über bestimmte Phänomene und Sachverhalte gewonnen hat, einen Nutzen zu ziehen. Die „Verwertung des Wissens“ spiegelt sich nicht zuletzt in der Entwicklung von Produkten wider. Bei diesem Prozess müssen Erkenntnisse von dem Fachbereich, der sich der Forschung widmet, in den Bereich übertragen werden, der sich um die Anwendung kümmert. In der Vergangenheit war der fächerübergreifende Transfer von Wissen und Ideen jedoch häufig vom Zufall geprägt. Eine systematische Übertragung von Erkenntnissen über die Grenzen klassischer Wissensdomänen hinweg fand in der Regel nicht statt.

Gegenwärtig ist eine Beschleunigung der Produktentwicklungsprozesse zu beobachten. Die Unternehmen sehen sich zunehmend gezwungen, in immer kürzer werdenden Abständen neue Produkte auf den Markt zu bringen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit aufrechterhalten zu können. Kleine Änderungen am Produkt lassen sich dabei dem Kunden weniger gut verkaufen als Produkte, die ihm etwas grundsätzlich Neues bieten [Sim99, S. 8]. Der „Zwang zu Innovationen“ stellt die Unternehmen vor die Herausforderung, bislang ungenutzte Potentiale in der Produktentwicklung aufzudecken und zu nutzen. Neben der Verbesserung und Optimierung bekannter Ansätze wird es dabei auch zunehmend notwendig, über grundsätzlich neue Lösungswege und Herangehensweisen nachzudenken.

Die Erfahrung zeigt, dass innovative Produkte vor allem dann entwickelt werden, wenn Erkenntnisse und Ideen anderer Fachgebiete mit in die Produktentwicklung einfließen. Es genügt nicht länger zu warten, bis dieses fachfremde Wissen „von selbst in der Produktentwicklung angekommen ist“. Vielmehr sind Strukturen und Werkzeuge zu schaffen, die den Prozess des Wissenstransfers aktiv unterstützen. Die vorliegende Arbeit leistete hierfür einen Beitrag. Am Beispiel der Bionik wurde darge-

stellt, wie der fachübergreifende Transfer von Wissen erfolgen kann und welche Möglichkeiten einer Unterstützung es gibt.

Das Kapitel 2 der Arbeit beschäftigte sich mit der Bionik sowohl aus theoretischer als auch aus praktischer Sicht. Zunächst wurde dargestellt, was unter Bionik und bionischem Arbeiten verstanden wird. Aus der Analyse des Schrifttums wurden zwei Aspekte deutlich. Zum einen ist es notwendig, im Rahmen einer Grundlagenforschung die Lösungen der Natur zu analysieren und zu verstehen, zum anderen müssen die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung von Produkten einfließen. In der Praxis erfolgt eine direkte Zusammenarbeit von Biologen und Ingenieuren meist nur innerhalb von geförderten Entwicklungsprojekten. Forschung und Anwendung stehen hier in einer wechselseitigen Beziehung, denn einerseits werden die Ergebnisse der Forschung in Anwendungen überführt, andererseits können sich aus der Entwicklung neue Fragen für die Grundlagenforschung ergeben.

Aus den Interviews mit bionisch arbeitenden Personen wurde deutlich, dass die Entstehung bionischer Produkte oft ihren eigenen Wegen folgt. Die Natur liefert auf vielen Ebenen Anregungen für die Produktentwicklung. Um Lösungen der Natur für die Produktentwicklung nutzen zu können, ist nicht immer ein detailliertes Verständnis der biologischen Vorgänge und Strukturen notwendig. Die Prinzipien, die die Leistungsfähigkeit biologischer Systeme begründen, sind bekannt und lassen sich in die Produktentwicklung übertragen. Oftmals liefert die Natur Ideen für den konzeptionellen Bereich. Eine Grundlagenforschung ist in diesen Fällen zum Teil nicht erforderlich.

Die Vielfalt bionischer Forschungsaktivitäten wurde in Kapitel 2 anhand der Teilgebiete der Bionik sowie einiger charakteristischer Beispiele dargestellt. Dabei wurde deutlich, dass Bionik zwar einerseits in vielfältiger Weise praktiziert wird, dass ihr aber andererseits der fundierte theoretische Unterbau einer Wissenschaft fehlt. Zwar gibt es im Schrifttum einige Ansätze, die die Bionik aus Sicht der Wissenschaftstheorie beleuchten [Gle98b; Ise01], dennoch ist festzustellen, dass die theoretischen Grundlagen der Bionik und die Darstellung der Methoden und Werkzeuge für das bionische Arbeiten in Anbetracht ihrer Bedeutung im Schrifttum unterrepräsentiert sind. Zukünftige Arbeiten zum Thema Bionik sollten sich daher diesem Aspekt verstärkt zuwenden.

Die Publikationen zum Thema Bionik fokussieren heute zumeist auf die Grundlagenforschung. Auch wenn dieser Teil des bionischen Arbeitens zweifelsfrei notwendig ist, so ist doch festzustellen, dass die Suche nach Anwendungsmöglichkeiten und die Übertragung der gefundenen Erkenntnisse in die Produktentwicklung einen ebenso wichtigen Teil des Prozesses ausmacht. Bislang, so scheint es, gelingt dieser Schritt nicht befriedigend. Zwar sind im Schrifttum Beispiele bionischer Produkte bekannt, doch deren Entstehungsgeschichte entspricht meist einer konventionellen Produktentwicklung. Die im Schrifttum postulierte Vorgehensweise für das bionische Arbeiten stellt in der Praxis die Ausnahme dar.

Vor diesem Hintergrund wurde in Kapitel 3 der Produktentwicklungsprozess näher beleuchtet. Um dem Leser ein Grundverständnis für die Thematik zu vermitteln, wurde zunächst die generelle Vorgehensweise bei der Entwicklung von Produkten beschrieben und einige Aspekte der Produktentwicklung verdeutlicht. Zudem wurde in einem kurzen Abriss dargestellt, welche Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um den Produktentwicklungsprozess zu unterstützen. Beleuchtet wurden hier vor allem die Methoden und Werkzeuge des Produktentwicklers.

Eine ausführliche Darstellung und Würdigung aktueller Forschungsaktivitäten im Bereich der Konstruktionswissenschaft konnte (und sollte) das Kapitel wegen des Umfangs der Thematik nicht leisten. Ziel war es vielmehr, den Leser für die Fragestellungen der Produktentwicklung zu sensibilisieren und Schnittstellen zur Bionik aufzuzeigen. Es wurde deutlich, dass sich bionisches Arbeiten am ehesten dann einsetzen lässt, wenn das Lösungskonzept noch nicht feststeht. Aus diesem Grund kann die Bionik bei Neukonstruktionen und in eingeschränktem Maße auch bei Anpassungskonstruktionen innovative Lösungsansätze liefern. Bei der Variantenkonstruktion hingegen, bei der die Lösung hinsichtlich ihres Funktionsprinzips, der Gestalt und der Materialien vorbestimmt ist, ist ein bionisches Arbeiten nicht sinnvoll.

Die Tatsache, dass Neukonstruktionen im Alltag der Produktentwicklung eher eine Ausnahme darstellen, verdeutlicht, dass hier der Bedarf nach „Inspirationen aus der Natur“ und somit auch nach einer bionischen Vorgehensweise vergleichsweise beschränkt ist. Der größte Bedarf für eine bionischen Vorgehensweise in der Produktentwicklung wird bei den Anpassungskonstruktionen gesehen. Auch wenn hier der Freiraum für die Produktgestaltung geringer ist als bei einer Neukonstruktion, lassen sich bei einer Anpassungskonstruktion Analogien zu biologischen Systemen vielfältig für die Lösungsfindung nutzen.

Eine Darstellung der Evolution technischer Systeme und charakteristischer Entwicklungstrends schließen das Kapitel 3 ab. Dabei werden Parallelen zur Evolution biologischer Systeme deutlich. Offenbar liegen dem Entwicklungsprozess von Systemen jeder Art ähnliche Gesetzmäßigkeiten zugrunde. Sie können genutzt werden, um Entwicklungspotentiale technischer Produkte zu ermitteln und die Ziele der Entwicklung festzulegen [Hil01, S. 99]. Ansätze, diesen Prozess methodisch zu unterstützen, existieren bereits [LJP+03; MAW03; BW03]. Sie sollten jedoch in weiterführenden Arbeiten detailliert und ausgebaut werden.

Das Kapitel 3 machte deutlich, dass die Produktentwicklung und die Bionik zahlreiche Schnittstellen haben. Vor allem im Bereich der Lösungsfindung kann das bionische Arbeiten dem Produktentwickler alternative Lösungsansätze aufzeigen, die zu innovativen Produkten führen. Aus diesem Grund wurde im Kapitel 4 der Prozess der Lösungsfindung detaillierter betrachtet. Anhand einiger Beispiele wurde gezeigt, wie der Produktentwickler im „Konstruktionsalltag“ zu Lösungsansätzen kommt und

welche Rolle Analogien in diesem Prozess spielen. Die Darstellung fokussierte dabei nicht allein auf Analogien aus der Natur. Ziel war es vielmehr, die generelle Bedeutung von Analogiebildung und Ähnlichkeitsbetrachtungen für den Produktentwicklungsprozess herauszustellen.

Ein Exkurs in die Analogielehre vermittelte dem Leser ein Verständnis von dem, was Analogien sind und wie sie „funktionieren“. Der Analogiebegriff wurde dabei aus philosophischer und psychologischer Sicht betrachtet. Die Bedeutung, die Analogien für das menschliche Denken haben, spiegelt sich auch in vielfältiger Weise in der Produktentwicklung wider. In dieser Arbeit wurde im Besonderen dargestellt, wie Analogien und Kreativitätstechniken zusammenhängen und welchen Bezug sie für das Konzept der Wiederverwendung haben. Zudem wurde detailliert, wie man sich den Ablauf der Lösungsfindung vorstellen kann und welchen Platz die Bionik in diesem Prozess einnimmt.

Das Kapitel 4 schließt mit einer theseförmigen Zusammenfassung. Darin wurde deutlich, dass die Analogiebildung ein wesentlicher Bestandteil eines jeden Produktentwicklungsprozesses ist. In diesem Zusammenhang hat der fächerübergreifende Transfer von Wissen und Ideen eine besondere Bedeutung, denn er bildet oft die Grundlage für die Entwicklung innovativer Produkte. Da in der Zukunft mit einer wachsenden Komplexität von Produkten und Prozessen gerechnet werden kann, wird es auch verstärkt notwendig werden, fachfremde Experten in den Produktentwicklungsprozess mit einzubinden. Zudem gewinnt die methodische Unterstützung des Prozesses und der Einsatz geeigneter Werkzeuge und Hilfsmittel zunehmend an Bedeutung. Es ist daher mit einem wachsenden Unterstützungsbedarf zu rechnen, der mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Mittel nicht hinreichend gedeckt werden kann.

Die Entwicklung geeigneter Werkzeuge und Methoden zur Unterstützung des interdisziplinären Wissenstransfers und ihre Nutzung im Produktentwicklungsprozess setzt voraus, dass die Vorgänge beim fachübergreifenden Transfer von Erkenntnissen und Ideen verstanden wurden. Im Kapitel 5 wurden daher Modelle vorgestellt, die den Übertragungsprozess beschreiben. Im Fokus standen dabei Modelle, die sich dem bionischen Arbeiten widmen. Es wurde deutlich, dass die Modelle nur eine Richtschnur für die Lösungssuche mittels Bionik darstellen. Die Definition eines konkreten Handlungsablaufs für das bionische Arbeiten ist offensichtlich wegen der Komplexität und der Vielschichtigkeit der Problematik nicht möglich.

Im Schrifttum der Bionik wird häufig die gemeinsame Funktion von biologischem und technischem System in den Mittelpunkt der analogen Übertragung gestellt. Im Kapitel 5 wurde jedoch darauf hingewiesen, dass die Funktion bei einer Analogiebildung in der Produktentwicklung nicht immer im Zentrum steht. Für das bionische Arbeiten ist es wichtig, eine Analogie in ihrer gesamten Tragweite zu betrachten. Um dieses ganzheitliche Analogiebild zu schaffen, wurde in Kapitel 5 das bionische Analogiemodell vorgestellt. Das Modell führt den Produktentwickler ausgehend von einer zufälligen

entstandenen oder mit Hilfe von Kreativitätstechniken erzeugten Assoziation in drei Schritten zu einem ganzheitlichen Analogiebild. Dem Produktentwickler wird es so möglich, Gemeinsamkeiten und Gegensätze der beteiligten Analoga zu erkennen und sich der Grenzen der Analogie bewusst zu werden. Durch das systematische Hinterfragen wird die Bildung von zweckmäßigen Analogien unterstützt, die der Produktentwickler nutzen kann, um Lösungsansätze zu generieren.

Des Weiteren wurde in Kapitel 5 die Einbindung fachfremder Experten in den Produktentwicklungsprozess diskutiert und der damit verbundene Kommunikationsprozess betrachtet. Da dieser Aspekt in den bekannten Übertragungsmodellen für die Bionik nur unzureichend zum Ausdruck kommt, wurde das Beziehungsnetzwerk zwischen Biologen und Ingenieuren in einem Kommunikationsmodell beschrieben. Im Zentrum dieses Modells steht das zuvor dargestellte bionische Analogiemodell. Es wurde herausgestellt, dass der Transfer von Wissen und Erkenntnissen, wie er in der Bionik stattfindet, nicht als einseitige Kommunikation sondern als Dialog zwischen Experten und Laien zu verstehen ist. Das Modell beschreibt dabei nicht nur den Wissenstransfer zwischen Personen. Wie gezeigt wurde, lässt es sich auch nutzen, um die Kommunikation von Ideen auf der individuellen und der organisatorischen Ebene darzustellen.

Der Wissenstransfer in der Bionik wird durch verschiedene Barrieren behindert. Ansätze zur deren Überwindung wurden in Kapitel 6 diskutiert. Zunächst wurde hier mit den Triadengesprächen ein Ansatz aufgegriffen, der ursprünglich entwickelt wurde, um die Weitergabe von Wissen vom Experten zum Novizen zu unterstützen [Dic06]. Im Vergleich zum moderierten Gespräch wird beim Triadengespräch ein Teil der methodischen Kompetenz des Moderators in die Gesprächssituation übertragen. Durch das Hinzuziehen einer dritten Person wird das Wissensprofil der Gruppe verändert und Gesprächsverlauf beeinflusst. Es wurde vorgeschlagen, bei einem Experten-Laien-Gespräch zwischen Biologen und Ingenieuren auch Novizen der beteiligten Fachrichtung mit einzubeziehen. Da der Novize mit seinem Wissensprofil zwischen den Profilen von Experten und Laien einzuordnen ist, kann er bei auftretenden Kommunikationsproblemen die Rolle des Vermittlers übernehmen.

Wie im Kapitel 6 dargestellt wurde, weist die Gruppenzusammensetzung bei Triadengesprächen Parallelen zur Organisationsform „interdisziplinäres Team“ auf. Es ist daher anzunehmen, dass das Triadengespräch sich gut mit der Arbeitsweise der Integrierten Produktentwicklung vereinbaren lässt. In der Praxis wurde der beschriebene Ansatz jedoch bislang noch nicht evaluiert. Eine Überprüfung im Rahmen von Bionik-Projekten in Unternehmen oder von studentischen Entwicklungsprojekten bleibt daher die Aufgabe zukünftiger Arbeiten.

Neben der methodischen Unterstützung der Kommunikation von Biologen und Ingenieuren wurden im Kapitel 6 auch mögliche Werkzeuge für das bionische Arbeiten diskutiert. Zunächst wurden bestehende Ansätze zur Unterstützung des Wissenstransfers dargestellt und ihr Nutzen für den bionisch

Arbeitenden untersucht. Dabei wurde herausgestellt, dass die bisherigen Ansätze „Insellösungen“ darstellen. Aus einer Verknüpfung der Ansätze würden Synergieeffekte für die Produktentwicklung erwachsen. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 6 das Konzept für ein Unterstützungssystem für die Bionik vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein Werkzeug für die Recherche, das dann zum Einsatz kommen soll, wenn der Produktentwickler nicht die Möglichkeit hat, mit einem Biologen in den Dialog zu treten. Das System führt die verschiedenen Facetten und Betrachtungsebenen der Bionik zusammen und macht das Wissen der Biologen für den Produktentwickler nutzbar. Das vorgeschlagene Werkzeug basiert auf einem semantischen Wiki, einer Sammlung von Webseiten, die auf einfache Art und Weise von Besuchern der Homepage geändert werden können. Durch die Verwendung von Klassen und kommentierten Relationen werden die Inhalte netzwerkartig strukturiert. Die so entstehende Ontologie ermöglicht eine Erweiterung der Such- und Filtermöglichkeiten herkömmlicher Wiki-Konzepte. Der Produktentwickler kann sich so bei seiner Recherche frei zwischen den verschiedenen Facetten eines Themas bewegen und sich die Informationen suchen, die für die Lösungsfindung relevant sind.

Das vorgestellte Konzept für das Unterstützungssystem versteht sich als Grundlage für weiterführende Diskussionen. Da es bislang nur ansatzweise prototypisch realisiert wurde, können derzeit noch keine endgültigen Aussagen hinsichtlich seiner Eignung als Werkzeug für die Produktentwicklung getroffen werden. Zudem befinden sich einige der vom Unterstützungssystem genutzten Technologien wie die semantische Wissensrepräsentation zur Zeit noch im Entwicklungsstadium. In Anbetracht dessen ergeben sich für zukünftige Arbeiten die folgenden Anknüpfungspunkte:

- Technologien für eine semantische Wissensrepräsentation weiterentwickeln
- Unterstützungssystem für die Bionik prototypisch umsetzen
- die vorgeschlagene Ontologie in einem Pilotprojekt evaluieren
- Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt nutzen, um die Ontologie anzupassen

Die Vorgehensweise – insbesondere das iterative Vorgehen beim Erstellen der Ontologie – erscheint recht pragmatisch. Zweifellos wäre es wünschenswert, wenn bereits am Ende der Konzeptphase eine „ausgereifte“ Ontologie zur Verfügung stehen und der Aufwand für die Anpassung entfallen würde. In der Praxis lässt sich dieser Ansatz jedoch meist nicht realisieren. Die Gründe hierfür sollen im Folgenden kurz benannt werden.

Die Ontologie stellt das Herzstück eines semantischen Wikis dar. Sie repräsentiert das gespeicherte Wissen und muss in der Lage sein, auf die Fragestellungen des Anwenders Antworten zu geben. Um eine Ontologie erstellen zu können, ist es daher notwendig, diese Fragen bereits im Vorfeld zu kennen. In der Realität ist dies jedoch nur eingeschränkt der Fall. Zwar ist im Grobem bekannt, in

welchem Umfeld das semantische Wiki zum Einsatz kommt und wer seine Nutzer sind, doch die konkreten Fragestellungen, mit denen die Nutzer das System konfrontieren werden, lassen sich unmöglich in vollem Umfang vorhersagen.

Vor diesem Hintergrund wird im Schrifttum vorgeschlagen, die Entwicklung von Ontologien als einen Prozess aufzufassen, der kontinuierlich betrieben werden muss [VPT+05]. Ein solcher Ansatz trägt nicht nur den Gegebenheiten der Praxis Rechnung. Er berücksichtigt auch die Tatsache, dass sich das Wissen ständig verändert und somit auch die Ontologie – als Form der Wissensrepräsentation im semantischen Wiki – fortwährend angepasst werden muss. Zudem ist es denkbar, dass sich während der Nutzungsphase die Fragestellungen der Nutzer an das System verändern. Auch in diesem Fall ist eine Anpassung der Ontologie notwendig.

Mit dem hier diskutierten Unterstützungssystem wurde ein Werkzeug für das bionische Arbeiten vorgestellt. Es richtet an Anwender in der industriellen Praxis. Einerseits ist es ein Werkzeug für Recherche, andererseits bietet es die Möglichkeit, Partner für Bionik-Projekte zu finden. Kommunikationsbarrieren in diesen interdisziplinär angelegten Projekten können mit der Experten-Laien-Gespräche abgebaut werden. Das Unterstützungssystem für die Bionik und die Experten-Laien-Kommunikation leisten damit einen Beitrag, die bionische Denk- und Arbeitsweisen in der industriellen Praxis zu etablieren. Dieser Schritt ist notwendig, will die Bionik ihre Existenzberechtigung auf Dauer aufrechterhalten. Zur Zeit genießt die Bionik ein positives Image. Sie hat den Anspruch, innovative Produkte hervorzubringen, und gilt daher als Impulsgeber für die Wirtschaft. Es verwundert daher nicht, dass die Fördermittelgeber derzeit Bionik-Projekte relativ großzügig unterstützen. Doch dieser Zustand wird nicht ewig währen. Es ist daher an der Zeit, dass die Bionik sich mit den Maßstäben des Marktes misst und sich im Alltag der Produktentwicklung bewährt. Sie auf diesem Weg zu unterstützen, war das Anliegen dieser Arbeit.

## Literaturverzeichnis

- [AG91] APITZ, K.; GEGER, M.: *Was Manager von der Blattlaus lernen können. Erfolgsrezepte der Natur im Unternehmen anwenden*. Wiesbaden: Gabler, 1991
- [AH87] ANDREASEN, M. M.; HEIN, L.: *Integrated Product Development*. Berlin: Springer, 1987
- [Ahr00] AHRENS, G.: *Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen. Methodische Voraussetzung und Anwendung in der Praxis*, Dissertation. TU Berlin, 2000
- [AK99] ABRAMOVICI, M.; GAYK, K.: *BIBILING. An information-broker for product development*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [ALA+03] AURISICCHIO, M.; LANGDON, P. M.; AHMED, S.; WALLACE, K. M.: *Investigating knowledge searches in aerospace design*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [Alt73] ALTSCHULLER, G. S.: *Erfinden: (K)ein Problem*. Berlin: Tribüne, 1973
- [Alt84] ALTSCHULLER, G. S.: *Erfinden: Wege zur Lösung technischer Probleme*. Berlin: Technik, 1984
- [And01] ANDREASEN, M. M.: *The contribution of design research to industry. Reflections on 20 years of ICED conferences*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling*. Glasgow, 2001
- [AS06] ALBERS, A.; SCHWEINBERGER, D.: *Bionik*. URL [http://rpkhome.mach.uni-karlsruhe.de/~paral/MAP/pnbionik\\_1.ppt](http://rpkhome.mach.uni-karlsruhe.de/~paral/MAP/pnbionik_1.ppt), 11.09.2006
- [Bar05] BARTHLOTT, W.: *Lotus-Effekt. Funktionsprinzip*. URL <http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/de/prinzip.html>, 01.08.2005
- [Bau04] BAUM, C.: *Mein Delfin - Mein Boot - Mein Antifouling. Umweltneutrales Antifouling. Eine Delfinhaut für Schiffe*. URL <http://www.hs-bremen.de/bionik/downloads/Kongress/AbstractBaum.pdf>, 02.08.2005
- [BBF05] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (HRSG.): *nanoTruck. Reise in den Nanokosmos*. URL <http://www.nanotruck.net/de/praesentationen/anwendungen.htm>, 01.08.2005
- [BC06] BAGG, A. M.; CANKIK-KIRSCHBAUM, E.: *Technische Experten in frühen Hochkulturen. Der Alte Orient*. In: KAISER, W.; KÖNIG, W. (Hrsg.), *Geschichte des Ingenieurs. Ein Beruf in sechs Jahrtausenden*. S. 5-31. München; Wien: Hanser, 2006
- [Bec98] BECHERT, D. W.: *Turbulenzbeeinflussung durch Widerstandminimierung*. In: GLEICH, A. VON (Hrsg.), *Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. S. 237-242. Stuttgart: Teubner, 1998
- [Ber05] BERLINGER, N.: *The War Against Gravity*. URL [http://www.inventionandtechnology.com/xml/2005/4/it\\_2005\\_4\\_feat\\_0.xml](http://www.inventionandtechnology.com/xml/2005/4/it_2005_4_feat_0.xml), 24.08.2005
- [BHR85] BECHERT, D. W.; HOPPE, G.; REIF, W. E.: *On the drag reduction of shark skin*. In: *AIAA-85-0546 report. AIAA conference*. Boulder (Colorado), 1985
- [Bir01] BIRKE, P.: *Bionische Strategie zur Entwicklung eines neuen audiovisuellen Raumkonzeptes für die Oper in Oslo*. In: WISSER, A.; NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 52-57. Mainz: Fischer, 2001
- [Bir97] BIRNBACHER, D.: *Natur als Maßstab menschlichen Handelns*. In: BIRNBACHER, D. (Hrsg.), *Ökophilosophie*. S. 217-241. Stuttgart: Reclam, 1997

- [BJ03] BROMME, R.; JUCKS, R.: *Wenn Experten und Laien sich nicht verstehen*. In: *Forschungsjournal der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster*. 12, S. 20-25, 2003
- [BKB99] BENDER, B.; KIESLER, M.; BEITZ, W.: *A model of analysis to improve teamwork performance*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [BKK+03] BORGELT, CH.; KLAWONN, F.; KRUSE, R.; NAUCK, D.: *Neuro-Fuzzy-Systeme*. Wiesbaden: Vieweg, 2003
- [Bli92] BLICKHAN, R.: *Bionische Perspektiven der aquatischen und terrestrischen Lokomotion*. In: NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 8*. S. 135-154. Stuttgart u. a.: Fischer, 1992
- [BMBF05] BMBF (HRSG.): *BMBF schreibt Ideenwettbewerb zur Bionik aus*. URL <http://www.bmbf.de/press/1592.php>, 21.01.2006
- [BN97] BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C.: *Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces*. URL <http://www.botanik.uni-bonn.de/system/planta.htm>, 01.08.2005
- [BN98] BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C.: *Lotusblumen und Autolacke. Ultrastruktur pflanzlicher Grenzflächen und biomimetische unverschmutzbare Werkstoffe*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 281-293. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [BNC04] BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C.; CERMAN, Z.: *The Lotus-Effect®: Non-adhesive Biological and Biomimetic Technical Surfaces*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Bor04] BORGES, R. F.: *The phi code in nature, architecture and engineering*. In: COLLINS, M. W.; BREBBIA, C. A. (Hrsg.), *Design and Nature II. Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. S. 401-409. Southampton: WIT Press, 2004
- [BR01] BROMME, R.; RAMBOW, R.: *Experten-Laien-Kommunikation als Gegenstand der Expertiseforschung. Für eine Erweiterung des psychologischen Bildes vom Experten*. In: SILBEREISEN, R. K.; REITZLE, M. (Hrsg.), *Psychologie 2000. Bericht über den 42. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie in Jena 2000*. S. 541-550. Lengerich: Pabst Science Publishers, 2001
- [Bra05] BRAUN, K.: *Vom Traum des Menschen zum Klettverschluss. Geschichtliches zur Bionik*. URL <http://www.biokon.net/bionik/download/HistorischesZurBionik.pdf>, 03.08.2005
- [Bra97] BRAUN, C.-F. VON: *Immer schneller? - Immer mehr? - Immer neu? - Immer besser?*. In: PIERER, H. VON; OTTINGER, B. VON (Hrsg.), *Wie kommt das Neue in die Welt?*. S. 299-312. München; Wien: Hanser, 1997
- [BS81] BOHREN, C. F.; SARDIE, J. M.: *Utilization of solar radiation by polar animals. An optical model for pelts. An alternative explanation*. In: *Applied Optics*. 20, S. 1894-1896, 1981
- [BSW01] BADKE-SCHAUB, P.; STEMPFLE, J.; WALLMEIER, S.: *Transfer of Experience in Critical Design Situations*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001
- [Bul04] BULSON, P. S.: *Music, nature and structural form*. In: COLLINS, M. W.; BREBBIA, C. A. (Hrsg.), *Design and Nature II. Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. S. 175-183. Southampton: WIT Press, 2004
- [Bun88] BUNDESVERBAND DEUTSCHER BANKEN E. V. (HRSG.): *Im Kreislauf der Wirtschaft*. Köln: Bank-Verlag, 1988

- [Bur01] BURCHARDT, C.: *Ein erweitertes Konzept für die Integrierte Produktentwicklung*, Dissertation. Universität Magdeburg, 2001
- [BVM01] BERCSEY, T.; VAJNA, S.; MACK, P.: *Genetic analogies in design*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling*. Glasgow, 2001
- [BW03] BREIDERT, J.; WELP, E. G.: *Tools supporting the development of modular systems*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [CBN05] CERMAN, Z.; BARTHLOTT, W.; NIEDER, J.: *Erfindungen der Natur. Bionik - Was wir von Pflanzen und Tieren lernen können*. Reinbeck: Rowohlt, 2005
- [CFG+05] CORCHO, O.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M.; GÓMEZ-PÉREZ, A.; LÓPEZ-CIMA, A.: *Building Legal Ontologies with METHONTOLOGY and WebODE*. In: BENJAMINS, R.; CASANOVAS, P.; BREUKER, J.; GANGEMI, A. (Hrsg.), *Law and the Semantic Web*. S. 142-157. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005
- [Cle05] CLEMENT, S.: *Erweiterung und Verifikation der Autogenetischen Konstruktionstheorie mit Hilfe einer evolutionsbasierten und systematisch-opportunistischen Vorgehensweise bei der Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme*, Dissertation. Universität Magdeburg, 2005
- [CMV+05] CREGAN, A.; MOCHOL, M.; VRANDECIC, D.; BECHHOFFER, S.: *Pushing the limits of OWL, Rules and Protege. A simple example*. URL <http://www.aifb.uni-karlsruhe.de/WBS/dvr/publications/rove.pdf>, 14.08.2006
- [COM05] COMPUTERBASE.DE (HRSG.): *Philips: Rückrufaktion wegen Stromschlag*. URL [http://www.computerbase.de/news/hardware/monitore\\_displays/2005/januar/philips\\_rueckrufaktion\\_stromschlag/](http://www.computerbase.de/news/hardware/monitore_displays/2005/januar/philips_rueckrufaktion_stromschlag/), 23.11.2005
- [Com73] COMMONER, B.: *Wachstumswahn und Umweltkrise*. München: Bertelsmann, 1973
- [Con81] CONRAD, W.: *Erfinder, Erforscher, Entdecker*. Leipzig; Jena; Berlin: Urania, 1981
- [Cro94] CROSS, N.: *Engineering Design Methods. Strategies for Product Design*. Chichester; New York; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley & Sons, 1994
- [Csi01] CSIKSZENTMIHALYI, M.: *Kreativität. Wie Sie das Unmögliche schaffen und Ihre Grenzen überwinden*. Stuttgart: Klett-Cotta, 2001
- [Dar04] DARWIN, C.: *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*. Hamburg: Nikol, 2004
- [DCP01] DARLINGTON, M. J.; CULLEY, S. J.; POTTER, S.: *Using Domain Knowledge to Support Design Requirements Elicitation*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001
- [DF99] DUFFY, A.; FERNS, A.: *An Analysis of Design Reuse Benefits*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [Dic06] DICK, M.: *Triadengespräche als Methode der Wissenstransformation in Organisationen*. In: LUIF, V.; THOMA, G.; BOOTHE, B. (Hrsg.), *Beschreiben - Erschließen - Erläutern. Psychotherapieforschung als qualitative Wissenschaft*. S. 141-166. Lengerich: Pabst, 2006
- [DIN84] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (HRSG.): *Titelangaben von Dokumenten. Zitierregeln*, DIN 1505-2, Berlin, 1984
- [DL06] DORRA, B.; LAKEW, A.: *Schneetreiben im Dienste moderner Schalldämmung*. In: *VDI Nachrichten*. 8, S. 9, 2006

- [Dör79] DÖRNER, D.: *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer, 1979
- [Dör95] DÖRNER, D.: *Problemlösen und Gedächtnis*. In: DÖRNER, D.; MEER, E. VAN DER (Hrsg.), *Das Gedächtnis: Probleme – Trends – Perspektiven*. S. 297-320. Göttingen: Hofgreffe, 1995
- [Dor97] DORST, K.: *Describing Design. A comparison of paradigms*, Dissertation. TU Delft, 1997
- [Dra02] DRACK, M.: *Bionik und Ecodesign. Untersuchung biogener Materialien im Hinblick auf Prinzipien, die für eine umweltgerechte Produktgestaltung nutzbar sind*, Dissertation. Universität Wien, 2002
- [Dud04] DUDENREDAKTION (HRSG.): *Duden. Die deutsche Rechtschreibung*. Mannheim u. a.: Dudenverlag, 2004
- [Ehr03] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsätze, Zusammenarbeit*. München; Wien: Hanser, 2003
- [Ehr95] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. München: Hanser, 1995
- [FB99] FRANKENBERGER, E.; BADKE-SCHAUB, P.: *Information management in engineering design. Empirical results from investigations in industry*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [FGJ97] FERNÁNDEZ-LÓPEZ, M.; GÓMEZ-PÉREZ, A.; JURISTO, N.: *METHONTOLOGY. From Ontological Art Towards Ontological Engineering*. In: *Spring Symposium on Ontological Engineering of AAAI*. California, 1997
- [Fie78] FIEDLER, W.: *Analogiemodelle bei Aristoteles. Untersuchungen zu den Vergleichen zwischen den einzelnen Wissenschaften und Künsten*. Amsterdam: Grüner, 1978
- [Fin98] FINGER, S.: *Design Reuse and Design Research*. In: *Design Reuse. Engineering Design Conference*. London, 1998
- [Fra05] FRAUNHOFER IUSE (HRSG.): *Stets rattenscharfe Messer*. URL [http://www.umsicht.flh-g.de/presse/bericht.php?titel=050120\\_rattenscharf&druck=1](http://www.umsicht.flh-g.de/presse/bericht.php?titel=050120_rattenscharf&druck=1), 21.01.2006
- [FZK04] FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE (HRSG.): *Die Biomechanik. 5 Beiträge*. DVD, Institut für Materialforschung II; Abteilung Biomechanik; HBM Videostudio; PAL/Deutsch, 7.10.2004
- [Gam96] GAMBER, P.: *Ideen finden, Probleme lösen*. Weinheim; Basel: Beltz, 1996
- [Geh05] GEHRING, P.: *Zirkulierende Körperstücke, zirkulierende Körperdaten. Hängen Biopolitik und Bionik zusammen?*. In: ROSSMANN, T.; TROPEA, C. (Hrsg.), *Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. S. 191-207. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; P. EBBESMEYER; F. KALLMEYER: *Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. München; Wien: Hanser, 2001
- [GEO06] GEO.DE (HRSG.): *Bionik: Funken wie die Delfine*. URL [http://www.geo.de/GEO/import\\_nicht\\_zugeordnet/702.html](http://www.geo.de/GEO/import_nicht_zugeordnet/702.html), 15.09.2006
- [Gér68] GÉRARDIN, L.: *La bionique*. Paris: Hachette, 1968
- [GG94] GROH, R.; GROH, D.: *Natur als Maßstab - eine Kopfgeburt*. In: KULTURAMT DER LANDESHAUPTSTADT STUTTGARD (Hrsg.), *Zum Naturbegriff der Gegenwart. Kongreßdokumentation zum Projekt "Natur im Kopf"*. S. 15-38. Stuttgart-Bad Cannstatt: frommann-holzboog, 1994

- [GH83] GICK, M. L.; HOLYOAK, K. J.: *Schema induction and analogical transfer*. In: *Cognitive Psychology*. 15, S. 1-38, 1983
- [Gle98a] GLEICH, A. VON: *Vorwort*. In: GLEICH, A. VON (Hrsg.), *Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. S. V-VII. Stuttgart: Teubner, 1998
- [Gle98b] GLEICH, A. VON: *Was können und sollen wir von der Natur lernen*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 191-210. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [God06] GODIN, S.: *Unleashing the Ideavirus*. URL <http://www.sethgodin.com/ideavirus/downloads/IdeavirusReadandShare.pdf>, 17.09.2006
- [Gol89] GOLDBERG, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading MA: Addison-Wesley, 1989
- [Gra04] GRAMANN, J.: *Problemmodelle und Bionik als Methode*, Dissertation. TU München, 2004
- [Gün04] GÜNTHER, H.: *Einbeziehung von Effekten der Biologie in die TRIZ-Methodik*. [http://www.triz-online-magazin.de/ausgabe05\\_04/artikel\\_1.htm](http://www.triz-online-magazin.de/ausgabe05_04/artikel_1.htm), 14.07.2006
- [Gün99] GÜNTHER, J.: *Individual influences of the design process. Time-oriented vs. quality-oriented design*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [Han68] HANSEN, F.: *Konstruktionssystematik. Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre*. Berlin: Technik, 1968
- [Har04] HARTMANN, A.: *Horizontaler Gentransfer. Ein natürlicher Prozess*. In: *mensch+umwelt spezial*. 17, S. 59-64, 2004
- [Har81] HARRÉ, R.: *Philosophies of Science*. Oxford: Oxford University Press, 1981
- [HE92] HUBKA, V.; EDER, W. E.: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1992
- [Hen01] HENNICKE, J.: *The Lightweight Natural Approach To Architecture*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 30-39. Stuttgart u. a.: Fischer, 2001
- [Hep97] HEPPNER, K.: *Organisation des Wissenstransfers. Grundlagen, Barrieren und Instrumente*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1997
- [Her06] HERDY, M.: *Evolutionstrategische Anpassung von Material-Modellen*. In: *Industriekongress Bionik 2006. Innovationsmotor Natur*. Berlin, 2006
- [Hes91] HESSE, F. W.: *Analoges Problemlösen. Eine Analyse kognitiver Prozesse beim analogen Problemlösen*. Weinheim: Psychologie Verlags Union, 1991
- [Hes98] HESSE, H. A.: *Experte, Laie, Dilettant. Über Nutzen und Grenzen von Fachwissen*. Opladen; Wiesbaden: Westdeutscher Verlag, 1998
- [Hil01] HILL, B.: *Produktentwicklung durch Naturorientierung*. In: WISSER, A.; NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 243-253. Mainz: Fischer, 2001
- [Hil04b] HILL, B.: *Fundamentals and Modelling of a Construction Bionics*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Hil98a] HILL, B.: *Erfinden mit der Natur. Funktionen und Strukturen biologischer Konstruktionen als Innovationspotentiale für die Technik*. Aachen: Shaker, 1998
- [Hil98b] HILL, B.: *Naturorientiertes Lernen*. Aachen: Shaker, 1998
- [Hil99] HILL, B.: *Naturorientierte Lösungsfindung. Entwickeln und Konstruieren nach biologischen Vorbildern*. Renningen-Malmsheim: expert, 1999

- [HMC+04] HUBA, A.; MOLNÁR, L.; CZMERK, A.; KESKENY J.: *Silicone Rubber Active Systems for Medical Application*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Hof76] HOFFMANN, L.: *Kommunikationsmittel Fachsprache*. Berlin: Akademie-Verlag, 1976
- [Hof96] HOFSTADTER, D. R.: *Die FARGonauten. Über Analogie und Kreativität*. Stuttgart: Klett-Cotta, 1996
- [Hol73] HOLZ, H.: *Analogie*. In: KRING, H.; BAUMGARTNER, H. M.; WILD, C. (Hrsg.), *Handbuch philosophischer Grundbegriffe*. S. 51-64. München: Kösel, 1973
- [Hor01] HORVÁTH, I.: *A contemporary survey of scientific research into engineering design*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling*. Glasgow, 2001
- [Ise01] ISENMANN, R.: *Innovationsquelle Natur. Was wir von der Natur zur Ableitung von ökologischen Innovationen lernen können*. In: WISSER, A.; NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 224-242. Mainz.: Fischer, 2001
- [Ise98] ISENMANN, R.: *Natur als Vorbild - Paradigma für Sustainability und ökologische Innovation*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 129-147. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [JRG+02] JAHN, F.; RÜCKERT, C.; GAEDECKE, O.; PIETZCKER, F.: *Konstruieren methodisch lehren. Führt die konstruktionsmethodische Ausbildung schon im Studium zu besseren Lösungen?*. In: HACKER, W. (Hrsg.), *Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung der frühen Phasen*. S. 155-167. Zürich: vdf Hochschulverlag AG & Rainer Hampp, 2002
- [Jün03] JÜNGLING, T.: *Mit Waben sicher in die Kurve*. URL <http://www.wams.de/data/2003/04/13/71265.html>, 21.01.2006
- [KB01] KEBKAL, K.; BANNASCH, R.: *Separation of time-varying multipath arrivals by converting their time delays into their frequency reallocations*. URL [http://www.evologics.de/documents/S2C\\_paper\\_ICA2001.pdf](http://www.evologics.de/documents/S2C_paper_ICA2001.pdf), 10.08.2005
- [Keb00] KEBKAL, K.: *Digitale akustische Datenübertragung über ein System kontinuierlich veränderlicher Frequenzen. Entwicklung und Test eines bionischen Verfahrens für die Unterwasser-Kommunikation*, Dissertation. TU Berlin, 2000
- [Kes01] KESEL, A.: *Material-Struktur-Funktion: Technisches Potential aus der Innovationswerkstatt Natur*. In: WISSER, A.; NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 164-176. Mainz: Fischer, 2001
- [Kes54] KESSELRING, F.: *Technische Kompositionslehre*. Berlin: Springer, 1954
- [KG04] KLYNE, G.; CARROLL, J. J.: *Resource Description Framework (RDF). Concepts and Abstract Syntax*. URL <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-concepts-20040210/>, 15.08.2006
- [KKB+04] KEBKAL, K.; KEBKAL, A.; BANNASCH, R.; YAKOVLEV, S.: *Parameter estimation of a sweep-spread carrier signal for advanced acoustic communication via multipath shallow water channels*. URL [http://www.evologics.de/documents/S2C\\_paper\\_ECUA2004.pdf](http://www.evologics.de/documents/S2C_paper_ECUA2004.pdf), 10.08.2005
- [KL96] KESEL, A.; LABISCH, S.: *Schlanke Hochbaukonstruktion Gras. Adaptive Materialanordnung im Hohlrohrquerschnitt*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 10*. S. 133-150. Stuttgart u. a.: Fischer, 1996

- [KM04] KLINGNER, R.; MANZ, H.: *Thermodynamic Behaviour of a Hornest Nest*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Kno97] KNOBLACH, J.: *Tokio, wir haben ein Problem*. URL <http://www.berlinonline.de/berliner-zeitung/archiv/.bin/dump.fcgi/1997/1030/blickpunkt/0003/>, 30.10.1997
- [Koc04] KOCH, R.: *Das 80/20-Prinzip. Mehr Erfolg mit weniger Aufwand*. Frankfurt am Main: Campus Verlag, 2004
- [Kol85] KOLLER, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen des methodischen Konstruierens*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1985
- [Koo98] KOON, D. W.: *Is polar bear hair fibre optic?*. In: *Applied Optics*. 37, S. 3198, 1998
- [KSS02] KLEBERT, K.; SCHRADER, E.; STRAUB, W. G.: *Moderationsmethode. Das Standardwerk*. Hamburg: Windmühle, 2002
- [KT02] KÜPPERS, U.; TRIBUTSCH, H.: *Verpacktes Leben - Verpackte Technik*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002
- [Kun98] KUNZMANN, P.: *Dimension von Analogie: Wittgensteins Neuentdeckung eines klassischen Prinzips*. Düsseldorf; Bonn: Parerga, 1998
- [Küp04] KÜPPERS, U.: *Progress in Bionic Packaging. Ostrich Shell and the Path Towards a Bionic Membrane for Food Packaging*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Lau01] LAUCHE, K.: *Heedful action, reflection, and transfer in the design process*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling*. Glasgow, 2001
- [LDL01] LIM, S.; DUFFY, A.; LEE, B. S.: *Shape Matching and Clustering*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001
- [Lei05] LEINHOS, T.: *Entwicklung einer Datenbank für die Wettbewerbsanalyse von Außenkarosserieteilen zur Unterstützung des Konzeptentwicklungsprozesses in der Nutzfahrzeugentwicklung*, Diplomarbeit. Universität Magdeburg, 2005
- [LH93] LINDE, H.; HILL, B.: *Erfolgreich erfinden*. Darmstadt: Hoppenstedt, 1993
- [Lie98] LIEBE, W.: *Die Masse im Wirbel als Mittel zur Fortbewegung bei Flosse und Flügel*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 49-64. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [Lin03] LINDEMANN, U.: *Methods are Networks of Methods*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [LJP+03] LEHTONEN, T.; JUUTI, T.; PULKKINEN, A.; RIITAHUHTA, A.: *Dynamic Modularisation. A Challenge for Design Process and Product Architecture*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [LK04] LIEDERT, R.; KESEL, A.: *Antifouling nach biologischem Vorbild. Bewuchsschutz durch Oberflächenmikrostrukturen*. URL [http://www.hs-bremen.de/bionik/downloads/Kongress/rliedert\\_poster\\_AntifoulingnachbiologischemVorbild.pdf](http://www.hs-bremen.de/bionik/downloads/Kongress/rliedert_poster_AntifoulingnachbiologischemVorbild.pdf), 02.08.2005
- [LMS+01] LOWE, A.; McMAHON, C. A.; SHAH, T.; CULLEY, S. J.: *The application of an automatic document classification system to aid the organizers of ICED 2001*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001

- [LN89] LALOUSCHEK, J.; NOWAK, P.: *Insider - Outsider. Die Kommunikationsbarrieren der medizinischen Fachsprache*. In: DESSLER, W. U.; WODAK, R. (Hrsg.), *Fachsprache und Kommunikation. Experten im sprachlichen Umgang mit Laien*. S. 6-18. Wien: Bundesverlag, 1989
- [LPR04] LUCHSINGER, R.; PEDRETI, M.; REINHARD, A.: *Pressure Induced Stability. From Pneumatic Structures to Tensairity*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Luk05] LUKSCH, H.: *Neurobionik. Prothetik, Biohybride und intelligente Algorithmen*. In: ROSSMANN, T.; TROPEA, C. (Hrsg.), *Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. S. 81-92. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005
- [LZ02] LYSENKO, V.; ZIMMERMANN, K.: *New procedure for designing optimised technical systems with the use of biological objects*. In: BREBBIA, C. A.; SUCHAROV, L. J.; PASCOLO, P. (Hrsg.), *Design and Natur. Comparing Design in Natur with Science and Engineering*. S. 115-122. Southampton: WIT Press, 2002
- [Mad02] MADER, G.: *Luftkampf im Wassermantel*. URL [http://www.fliegerrevue.de/doc\\_article.asp?AID=9520](http://www.fliegerrevue.de/doc_article.asp?AID=9520), 10.08.2005
- [Mar03] MARJANOVIĆ, D.: *About the design policy*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [Mat06] MATTHECK, C.: *Verborgene Gestaltgesetze der Natur*. Karlsruhe: Mende, 2006
- [Mat97] MATTHECK, C.: *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*. Freiburg im Breisgau: Rombach, 1997
- [MAW03] MÖLLER, B.; ANDERSSON, S.; WIKANDER, J.: *Modularisation of mechatronic mechanisms with dependent degrees of freedom*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [May79] MAYER, R. E.: *Denken und Problemlösen. Eine Einführung in menschliches Denken und Lernen*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1979
- [MB00] MILLER, L.; BRICKLEY, D.: *The Friend of a Friend (FOAF) project*. URL <http://www.foaf-project.org>, 14.03.2007
- [MBW93] MOSTOW, J.; BARLEY, M.; WEINRICH, T.: *Automated Reuse of Design Plans*. In: *Artificial Intelligence in Engineering Design*. 2, S. 2-15, 1993
- [MCS+01] MABOGUNJE, A.; CARRIZOSA, K.; SHEPPARD, S.; LEIFER, L. J.: *Towards a science of engineering design teams*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001
- [Met03] METTERNICH, U.: *9 G mit einem Lächeln*. URL [http://www.y-punkt.de/sixcms/detail.php?template=themen\\_artikel\\_archiv&\\_rubrik=Forschung&\\_id=1338972](http://www.y-punkt.de/sixcms/detail.php?template=themen_artikel_archiv&_rubrik=Forschung&_id=1338972), 10.08.2005
- [MH04] MCGUINNESS, D. L.; HARMELLEN, F. VAN: *OWL Web Ontology Language*. URL <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-features-20040210/>, 15.08.2006
- [Mir01] MIRTSCH, F.: *Bionisches Material durch Wölbstrukturieren*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 13-29. Stuttgart u. a.: Fischer, 2001
- [MK86] MICHAILENKO, W. I.; KASCHTSCHENKO, A. W.: *Natur - Geometrie - Architektur*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1986
- [Möh04] MÖHL, B.: *A Bionic Robot Arm with a Composite Drive Mechanism*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004

- [Mö104] MÖLLER, E.: *Schreibkollektiv. Mediawiki installieren und warten*. URL [http://www.linux-magazin.de/Artikel/ausgabe/2004/04/064\\_mediawiki/mediawiki.html](http://www.linux-magazin.de/Artikel/ausgabe/2004/04/064_mediawiki/mediawiki.html), 14.08.2006
- [MR98] MOSBRUGGER, V.; ROTH, A.: *Prinzipien der Evolution natürlicher Konstruktionen - Pflanzliche Wasserstoffsysteme als Modelle für anthropogene Transportsysteme*. In: GLEICH, A. VON (Hrsg.), *Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. S. 91-108. Stuttgart: Teubner, 1998
- [MT02] MATTHECK, C.; TESARI, I.: *Integrating biological optimisation methods into engineering design process*. In: BREBBIA, C. A.; SUCHAROV, L. J.; PASCOLO, P. (Hrsg.), *Design and Natur. Comparing Design in Natur with Science and Engineering*. S. 27-36. Southampton: WIT Press, 2002
- [Mül04] MÜLLER, T.: *Formadaptive Turbinenschaufel*. URL [http://www.uni-kassel.de/wiss\\_tr/images/poster\\_tmuedler.pdf](http://www.uni-kassel.de/wiss_tr/images/poster_tmuedler.pdf), 10.08.2006
- [Mül90] MÜLLER, J.: *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1990
- [Nac01] NACHTIGALL, W.: *Einige funktionelle und baubionische Eigentümlichkeiten im alttürkisch-anatolischen Haus*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 263-279. Stuttgart u. a.: Fischer, 2001
- [Nac05] NACHTIGALL, W.: *Biologisches Design. Systematischer Katalog für bionisches Gestalten*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005
- [Nac92] NACHTIGALL, W.: *Technische Biologie und Bionik - was ist das?*. In: NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 8*. S. 1-12. Stuttgart u. a.: Fischer, 1992
- [Nac96] NACHTIGALL, W.: *Vorwort*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 10*. S. IX-XII. Stuttgart u. a.: Fischer, 1996
- [Nac97] NACHTIGALL, W.: *Vorbild Natur*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1997
- [Nac98a] NACHTIGALL, W.: *Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998
- [Nac98b] NACHTIGALL, W.: *Zehn Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen - "Zehn Gebote" bionischen Designs*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 295-306. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [Nac98c] NACHTIGALL, W.: *Technische Biologie und Bionik*. In: GLEICH, A. VON (Hrsg.), *Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. S. 35-49. Stuttgart: Teubner, 1998
- [Nau05] NAUMANN, T.: *Adaptives Systemmanagement. Ein Ansatz für die Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen*, Dissertation. Universität Magdeburg, 2005
- [NB00] NACHTIGALL, W.; BLÜCHEL, K. G.: *Das große Buch der Bionik. Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur*. Stuttgart; München: Deutsche Verlags-Anstalt, 2000
- [Neu93] NEUMANN, D. (HRSG.): *Technologieanalyse Bionik. Analysen und Bewertungen zukünftiger Technologien*. Düsseldorf: VDI Technologiezentrum, Physikalische Technologien, 1993
- [Neu96] NEUMANN, D.: *Zwischen Biologie und Technik. Die Entwicklung der Bionik*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 10*. S. 15-22. Stuttgart u. a.: Fischer, 1996
- [Nöl04] NÖLKE, M.: *So managt die Natur*. In: *Evolution II*. Null-Nummer, S. 81-89, 2004
- [Nür05] NÜRNBERGER, D.: *Waschmaschinentest 2005*. URL <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/verbrauchertipp/414744/>, 23.11.2005

- [NVG04] NAUMANN, T.; VAJNA, S.; GATZKY, T.: *Integrierte Produktentwicklung als Ausbildungskonzept*. In: *CAD-CAM Report 23. 2*, S. 48-51, 2004
- [Oli01] OLIGMÜLLER, D.: *Ganzheitliche Betrachtungsweise bei der Weiterentwicklung bionischer Systeme in der Architektur, im Städtebau und im Verkehrswesen*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 254-262. Stuttgart u. a.: Fischer, 2001
- [Ott01] OTTOSSON, S.: *Dynamic concept development. A key for future profitable innovations and new products variants*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling*. Glasgow, 2001
- [Pah95] PAHL, G.: *Ist Konstruieren erlernbar oder doch eine Kunst*. In: VDI (Hrsg.), *VDI Berichte 1169. Effizienter Entwickeln und Konstruieren*. S. 27-44. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995
- [Pat05] PATSCHULL, K.: *Bionik*. URL [http://www.magazin-deutschland.de/issue/Bionik\\_3-05.php](http://www.magazin-deutschland.de/issue/Bionik_3-05.php), 03.08.2005
- [PB00] PREISER, S.; BUCHHOLZ, N.: *Kreativität. Ein Trainingsprogramm in sieben Stufen für Alltag und Beruf*. Heidelberg; Kröning: Roland Asanger, 2000
- [PB02] PASINI, D.; BURGESS, S. C.: *Optimal structural features in trees and their application in engineering*. In: BREBBIA, C. A.; SUCHAROV, L. J.; PASCOLO, P. (Hrsg.), *Design and Nature. Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. S. 3-15. Southampton: WIT Press, 2002
- [PB93] PAHL, G.; BEITZ, W.: *Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1993
- [Poh99] POHLHEIM, H.: *Evolutionäre Algorithmen. Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1999
- [Por97] PORTER, M.: *Vorteile für den Wettbewerb von morgen*. In: GIBSON, R. (Hrsg.), *Rethinking the future*. S. 87-104. Landsberg: Moderne Industrie, 1997
- [PPO+98] PETERSSON, H.; K. PERSSON; S. ORMARSSON; O. DAHLBLOM: *Mechanical properties of wood determined by cell structure modelling*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 271-280. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [PS89] PFEIFFER, O. E.; STROUHAL, E.: *Das Gesetz aus dem Baukasten. Zur Herstellung von Wirklichkeit durch juristische Sprachschablonen*. In: DESSLER, W. U.; WODAK, R. (Hrsg.), *Fachsprache und Kommunikation. Experten im sprachlichen Umgang mit Laien*. S. 19-29. Wien: Bundesverlag, 1989
- [Pug90] PUGH, S.: *Total Design*. New York: Addison-Wesley, 1990
- [PW06] PÖTKE, M.; WINES, E.: *Using Geometric Part Search to Integrate Processes and Companies*. In: *PLM User Conference*. Long Beach, 2006
- [RB06] RUMMEL, G.; BIRKE, P.: *Die Methode SQAT - engineered transfer to solution*. URL <http://www.bionicsolutions.de/index.php?methode>, 30.03.2006
- [Rec94] RECHENBERG, I.: *Evolutionsstrategie '94*. Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1994
- [Rei81] REIF, W. E.: *Oberflächenstrukturen und -skulpturen bei schnellschwimmenden Wirbeltieren*. In: REIF, W. E. (Hrsg.), *Paläontologische Kursbücher Bd.1, Funktionsmorphologie*. S. 141-157. München: Paläontologische Gesellschaft, 1981
- [Rei84] REICHEL, R.: *Dialektisch-materialistische Gesetzmäßigkeiten der Technikevolution*. Berlin: Urania, 1984

- [Rei92] REINER, R.: *Selbstorganisation. Anwendung eines biologischen Prinzips*. In: NACHTIGALL, W. (Hrsg.), *BIONA-report 8*. S. 13-26. Stuttgart u. a.: Fischer, 1992
- [Rog62] ROGERS, E. M.: *Diffusion of Innovations*. New York: Free Press, 1962
- [Rop98] ROPOHL, G.: *Wie die Technik zur Vernunft kommt. Beiträge zum Paradigmenwechsel in den Technikwissenschaften*. Amsterdam: G+B Fakultas, 1998
- [Ros04] ROSSON, B. T.: *Structural analysis using nature's golden proportion*. In: COLLINS, M. W.; BREBBIA, C. A. (Hrsg.), *Design and Nature II. Comparing Design in Nature with Science and Engineering*. S. 15-24. Southampton: WIT Press, 2004
- [Rot94] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Berlin: Springer, 1994
- [Rot95] ROTH, K.: *Wahl des Gliederungsprinzips von Konstruktionskatalogen*. In: *19. Kolloquium Konstruktionstechnik*. Magdeburg, 1995
- [Rug74] RUGENSTEIN, J.: *Methodischen Konstruieren*. Karl-Marx-Stadt: Institut für Fachschulwesen der DDR, 1974
- [Rum01] RUMMEL, G.: *Bionische Strategie zur Entwicklung eines neuen audiovisuellen Raumkonzeptes für die Oper in Oslo*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 15*. S. 40-51. Stuttgart u. a.: Fischer, 2001
- [Rum04] RUMMEL, G.: *SFT - Eine neue Methode der anwendungsorientierten Bionik*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [Rüp04] RÜPPEL, G.: *Signale im Flug. Kommunikation bei Libellen*. Vortrag auf dem 2. Bremer Bionik-Kongress der Hochschule Bremen, 29.-30.10.2004
- [Sch01] SCHULZ VON THUN, F.: *Miteinander reden 1. Störungen und Klärungen*. Reinbeck: Rowohlt Taschenbuch, 2001
- [Sch02] SCHWEINBERGER, D.: *Eine Methodik zur Unterstützung der Suche und Auswahl von Partnern für kooperative Produktinnovationsprojekte*, Dissertation. TU Karlsruhe, 2002
- [Sch06a] SCHAFFERT, S.: *IkeWiki: A Semantic Wiki for Collaborative Knowledge Management*. URL [http://www.wastl.net/download/paper/schaffert06\\_ikewiki.pdf](http://www.wastl.net/download/paper/schaffert06_ikewiki.pdf), 14.08.2006
- [Sch06b] SCHILLING, C.: *Bionik und Konstruktionssystematik - verwandte Wissensgebiete dargestellt an einem Beispiel in der Ingenieurausbildung*. Unveröffentlichte Präsentation zu einem Vortrag anlässlich des DBU-Bionik-Seminars vom 2.-7. Juli. Ostritz, 2006
- [Sch97a] SCHMIDHEINY, S.: *Innovation und globale Verantwortung*. In: PIERER, H. VON; OTTINGER, B. VON (Hrsg.), *Wie kommt das Neue in die Welt?*. S. 293-298. München; Wien: Hanser, 1997
- [Sch97b] SCHULZE, G.: *Steigerung und Ankunft. Über die Endlichkeit des Fortschritts*. In: PIERER, H. VON; OTTINGER, B. VON (Hrsg.), *Wie kommt das Neue in die Welt?*. S. 275-291. München; Wien: Hanser, 1997
- [Sch98] SCHMITZ, H.: *Infrarotdetektion mit einem photomechanisch arbeitenden Infrarotrezeptor. Kann der "Waldbranddetektor" des schwarzen Kiefernprachtkäfer als Vorlage für einen entsprechenden IR-Sensor dienen?*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 12*. S. 241-244. Stuttgart u. a.: Fischer, 1998
- [SD01] SMITH, J.; DUFFY, A.: *Re-using knowledge - why, what, and where*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001
- [Sei04] SEIFERT, J. W.: *Visualisieren. Präsentieren. Moderieren.*. Offenbach: Gabal, 2004

- [SFL+06] SPECK, T.; FUCHS, F.; LUCHSINGER, R.; BUSCH, S.; RÜGGERBERG, M.; SPECK, O.: *Selbstreparierende Membranen nach biologischem Vorbild*. In: *Industriekongress Bionik 2006. Innovationsmotor Natur*. Berlin, 2006
- [SFM+05] SCHILLING, C.; FETTER, R.; MÄMPPEL, J.; SCHADE, J.; KEMPF, W.; VOGES, D.; HILL, B.; WITTE, H.: *Towards a Bionic Algorithm*. In: *3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines*. Ilmenau, 2005
- [Sim99] SIMON, W.: *Lust aufs Neue. Werkzeuge für das Innovationsmanagement*. Offenbach: Gabal, 1999
- [SKB99] SCHULZ, J.; KEUTGEN, I.; BIRKHOFER, B.: *User-oriented presentation of available categorised knowledge. Providing on-demand a flexible, relevant knowledge-base access*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [SKH+06] SCHILLING, C.; KEMPF, W.; HILL, B.; WITTE, H.: *Content-Management-System als Instrument zur Systematischen Analogisierung von Struktur-Funktions-Beziehungen in biologischen und technischen Objekten*. Unveröffentlichtes Manuskript. Ilmenau, 2006
- [SKW06] SCHILLING, C.; KEMPF, W.; WITTE, H.: *Ein internet-basiertes Lehr- und Informationssystem für bionische Aspekte in der Mechatronik*. In: *Proceedings REMUS 2006. Mechatronic Systems. Development, Application, Perspective*. Niš (Serbien), 2006
- [SMS+04] STEGMEIER, T.; MILWICH, M.; SCHERRIEBLE, A.; GEUER, M.; PLANK, H.: *Bionik Developments based on Textile Materials for Technical Applications*. In: *First International Industrial Conference Bionik2004*. Düsseldorf, 2004
- [SS05] STELZER, M.; STRYK, O. VON: *Laufbewegungen bei Roboter, Tier und Mensch. Analyse, Modellierung, Simulation und Optimierung*. In: ROSSMANN, T.; TROPEA, C. (Hrsg.), *Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. S. 145-158. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005
- [Sta06] STANGL, W.: *Kommunikation*. URL <http://www.stangltaller.at/ARBEITSBLAETTER/KOMMUNIKATION/>, 01.08.2006
- [Suh90] SUH, N. P.: *The Principles of Design*. New York; Oxford: Oxford University Press, 1990
- [Sze05] SZENTPETERY, V.: *Tsunami-Forscher nutzen die Sprache der Delphine*. URL <http://www.welt.de/data/2005/06/22/735139.html>, 10.08.2005
- [Tho05] THOENY, P.: *Neue Wege. Wie Sie TWiki im Unternehmen einführen und eine neue Kommunikationskultur schaffen*. URL [http://www.linux-magazin.de/Artikel/ausgabe/Sonderheft\\_2005/02/twiki/twiki.html](http://www.linux-magazin.de/Artikel/ausgabe/Sonderheft_2005/02/twiki/twiki.html), 14.08.2006
- [Tie93] TIEMANN, A.: *Analogie. Analyse einer grundlegenden Denkweise in der Physik*. Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 1993
- [Tri95] TRIBUTSCH, H.: *Bionik solarer Energiesysteme*. In: NACHTIGALL, W.; WISSER, A. (Hrsg.), *BIONA-report 9*. S. 147-170. Stuttgart u. a.: Fischer, 1995
- [Tri98] TRIBUTSCH, H.: *Bionische Vorbilder für eine solare Energietechnik*. In: GLEICH, A. VON (Hrsg.), *Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. S. 219-236. Stuttgart: Teubner, 1998
- [Trø97] TRØBORG, J.: *Lernen und Ausbildung - die Grundlage der Innovation*. In: PIERER, H. VON; OTTINGER, B. VON (Hrsg.), *Wie kommt das Neue in die Welt?*. S. 247-255. München; Wien: Hanser, 1997

- [TWW01] THOBEN, K.-D.; WEBER, F.; WUNRAM, M.: *Towards pragmatic approaches for knowledge management in engineering. Theory and industrial applications*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Management - Process and Information Issues*. Glasgow, 2001
- [UE95] ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D.: *Product Design and Development*. New York: McGraw-Hill, 1995
- [UII97] ULLMANN, D. G.: *The Mechanical Design Process*. Boston: McGraw-Hill, 1997
- [Ums99] UMSTÄTTER, W.: *Wissensorganisation mit Hilfe des semiotischen Thesaurus - auf der Basis von SGML bzw. XML*. URL <http://www.ib.hu-berlin.de/~wumsta/pub113.pdf>, 12.12.2005
- [Vaj82] VAJNA, S.: *Rechnerunterstützte Anpassungskonstruktion*, Dissertation. Universität Karlsruhe, 1982
- [VB72] VOGEL, S.; BRETZ, W. L.: *Interfacial organisms. Passive ventilation in the velocity gradients near surfaces*. In: *Science* 175, 4018, S. 210-211, 1972
- [VB94] VAJNA, S.; BERCESEY, T.: *Autogenetischer Ansatz für die Konstruktionstheorie. Beitrag zur vollständigen Beschreibung des Konstruktionsprozesses*. In: *CAD-CAM Report* 13, 2 und 3, S. 66-71 bzw. 98-105, 1994
- [VBC+04] VAJNA, S.; BERCESEY, T.; CLEMENT, S.; JORDAN, A.; MACK, P.: *Autogenetische Konstruktionstheorie - Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie*. In: *Konstruktion*, 3, S. 71-77, 2004
- [VCJ+05] VAJNA, S.; CLEMENT, S.; JORDAN, A.; BERCESEY, T.: *The Autogenetic Design Theory. An evolutionary view of the design process*. In: *Journal of Engineering Design*, 4, S. 423-440, 2005
- [VDI03] VDI (HRSG.): *Ideenreich. Fragen an Elmer Schmidt, Erfinder eines Rotations-tauschers*. URL <http://www.vdi-nachrichten.com/library/pdf/redaktion/ideenreich17.pdf>, 21.01.2006
- [VDI2221] VDI (HRSG.): *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, Düsseldorf, 1993
- [VDI2222] VDI (HRSG.): *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*, VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1, Düsseldorf, 1997
- [Ves91] VESTER, F.: *Ballungsgebiete in der Krise*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1991
- [VJ04] VAJNA, S.; JORDAN, A.: *CAD/CAM-Anwendung*, Vorlesungsskript. Universität Magdeburg, 2004
- [VK06] VRANDECIC, D.; KRÖTZSCH, M.: *Reusing Ontological Background Knowledge in Semantic Wikis*. In: *Proceedings of the First Workshop on Semantic Wikis. From Wikis to Semantics*. Budva, Montenegro, 2006
- [VKV+06] VÖLKEL, M.; KRÖTZSCH, M.; VRANDECIC, D.; HALLER, H.; STUDER, R.: *Semantic Wikipedia*. In: *Proceedings of the 15th international conference on World Wide Web, WWW 2006*. Edinburgh, Schottland, 2006
- [VM02] VINCENT, J. F. V.; MANN, D. L.: *Systematic technology transfer from biology to engineering*. In: *Phil Trans R Soc A*, 360, S. 159-174, 2002
- [VN01] VAJNA, S.; NAUMANN, T.: *Implementation of the New IPD study course at the Otto-von-Guericke University of Magdeburg*. In: *Proceedings ICED 01 - Design Applications*. Glasgow, 2001

- [Vog00] VOGEL, S.: *Von Grashalmen und Hochhäusern. Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000
- [VPT+05] VRANDECIC, D.; PINTO, S.; TEMPICH, C.; SURE, Y.: *The DILIGENT knowledge processes*. In: *Journal of Knowledge Management*. 5, S. 85-96, 2005
- [VS90] VAJNA, S.; SCHLINGENSIEPEN, J.: *Wörterbuch der C-Technologien*. Heidelberg: Dressler, 1990
- [WDR04] WDR.DE (HRSG.): *Straßenbahn-Debakel deutlich teurer*. URL [http://www.wdr.de/themen/verkehr/oepnv/siemens\\_ruackrufaktion/index\\_180504.jhtml](http://www.wdr.de/themen/verkehr/oepnv/siemens_ruackrufaktion/index_180504.jhtml), 23.11.2005
- [Weg99] WEGNER, B.: *Autogenetische Konstruktionstheorie: Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie auf der Basis Evolutionärer Algorithmen*, Dissertation. Universität Magdeburg, 1999
- [WIK06a] WIKIPEDIA.DE (HRSG.): *Automobil*. URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Automobil>, 10.01.2006
- [WIK06b] WIKIPEDIA.DE (HRSG.): *Explosionsmotor*. URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Explosionsmotor>, 10.01.2006
- [WIK06d] WIKIPEDIA.DE (HRSG.): *Strategie*. URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Strategie>, 12.09.2006
- [Wög43] WÖGERBAUER, H.: *Die Technik des Konstruierens*. München; Berlin: Oldenbourg, 1943
- [Woh05] WOHLGEMUTH, U.: *Industriedesign für nachhaltige Produkte, was bringt Bionik*. In: ROSSMANN, T.; TROPEA, C. (Hrsg.), *Bionik. Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. S. 267-282. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005
- [Woh06] WOHLGEMUTH, U.: *Der Löschkäfer oder eine Offroad-Lösch-Einheit namens OLE*. URL <http://www.hs-magdeburg.de/hochschule/einrichtung/pressestelle/pressemitteilg/mitteilungansehen?schluessel=241>, 17.09.2006
- [WS49] WEAVER, W.; SHANNON, C. E.: *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, Illinois: University of Illinois Press, 1949
- [WSW+03] WALTER, S.; SAUER, T.; WEISS, S.; BIRKHOFFER, B.: *Efficient support for the product development process. A computer-based method-tools for the conceptual phase*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [Wüs98] WÜSTENBERG, D.: *Kreativität bei der Konstruktion von Maschinen*. In: GLEICH, A. VON (Hrsg.), *Bionik. Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?*. S. 111-136. Stuttgart: Teubner, 1998
- [YC99] YANG, M. C.; CUTKOSKY, M. R.: *Maschine Generation of Thesauri. Adaption to Evolving Vocabularies in Design Documentation*. In: *Proceedings ICED 99*. München, 1999
- [Zer87] ZERBST, E. W.: *Bionik. Biologische Funktionsprinzipien und ihre technische Anwendungen*. Stuttgart: Teubner, 1987
- [ZT03] ŽAVBI, R.; TAVCAR, J.: *Some observations on work within a virtual product development team..* In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003
- [ZV03] ZIRKEL, M.; VAJNA, S.: *Pro-Teach-Net. An e-learning platform for product development*. In: *Proceedings ICED 03 - Research for Practice. Innovation in Products, Processes and Organisations*. Stockholm, 2003

- 
- [Zwi66] ZWICKY, F.: *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*. Zürich: Droemer Knaur, 1966

## **Anhang A E-Mail mit Interviewanfrage**

Guten Tag, [Anrede],

gestatten Sie, dass ich mich und mein Anliegen kurz vorstelle:

Ich bin Promotionsstudent am Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik der Uni Magdeburg. Im Rahmen meiner Dissertation beschäftige ich mich mit der Bionik aus methodischer Sicht. In meiner Arbeit möchte ich den Prozess, der zur Entwicklung "bionischer Produkte" führt, näher beleuchten, um darauf aufbauend dem Produktentwickler und Ingenieur geeignete Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung anzubieten können.

Warum nun schreibe ich Sie an? Um den Entwicklungsprozess besser zu verstehen, möchte ich gern Personen, die bionische Produkte entwickelt haben oder an derer Entwicklung mitwirkten, interviewen. In meiner Recherche bin ich auf Ihre Arbeiten gestoßen. Demnach entwickeln Sie Produkte/Produktideen und lassen sich dabei von der Lösungen der Natur inspirieren. Könnten Sie sich vorstellen, mir einige Fragen zu Ihrer Person zu beantworten und mir von Ihrer Arbeit zu berichten? Sie würden mich damit bei meiner kleinen Studie sehr unterstützen?

Ich habe mir vorgestellt, dass wir einen Termin finden, an dem ich Sie besuche. Das Gespräch wird, so denke ich, nicht länger als 2 Stunden dauern. Ich würde es gern auf Video aufzeichnen, um es später auswerten zu können. Wären Sie mit einer solchen Vorgehensweise einverstanden?

Ich freue mich auf Ihre Antwort und verbleibe mit freundlichen Grüßen,

A. Jordan

PS: Sind Ihnen weitere Personen bekannt, die ich im Rahmen meiner Befragung um ein Interview bitten könnte?

## **Anhang B Fragenbogen**

## Studie zur Bionik

*Vielen Dank, dass Sie sich die Zeit nehmen, mir einige Fragen zu beantworten!*

*Meine Intension ist es, den Prozess, der zu einem bionischen Produkt führt, zu verstehen. Die schriftliche Beantwortung der unten aufgeführten dient mir quasi als Ersatz für ein Interview. Bitte verstehen Sie die Fragen lediglich als Rahmen zur Beschreibung der Dinge, die mich besonders interessieren. Ein "freies Erzählen", das Hintergründe beleuchtet und Anekdoten preisgibt, hilft mir bei meiner Arbeit mehr als ein exaktes Beantworten der Fragen.*

*Noch einmal vielen Dank für Ihre Bemühungen!*

### Teil I: Fragen zur Person

1. Welche Ausbildung/Studium haben Sie absolviert?
2. Was ist Ihr gegenwärtiges Arbeitsgebiet?
3. Verstehen Sie sich als ...
  - a) Ingenieur?
  - b) Biologe?
  - c) weder noch?

### Teil II: Fragen zum Produkt

1. Worum handelt es sich bei dem Produkt? Was ist das besondere daran?
2. Würden Sie das Produkt als "bionisch" bezeichnen? Wenn ja, warum? In welchen Punkten wurde das Produkt von Lösungen aus anderen Fachbereichen beeinflusst?
3. Würden Sie das Produkt als "innovativ" bezeichnen? Wenn ja, warum?
4. In welcher Weise wird die Analogie zur Natur als Verkaufsargument genutzt? Wenn ja, bringt dies Vorteile gegenüber den Produkten der Wettbewerber?
5. Welche Beziehung haben Sie heute zu dem Produkt? (Hersteller? Patentinhaber? Lizenzgeber?)

## Teil III: Fragen zum Prozess

### Ideenfindung

#### Situation

1. *Ist die Idee das Ergebnis einer zielgerichteten Suche zur eine Lösung eines konkreten Problems? Wenn ja, was war das für ein Problem?*
2. *Inwiefern steht die Entdeckung/Idee in Zusammenhang mit Ihrem Arbeitsgebiet?*

#### Arbeitsweise

1. *Wie entstand die Idee, das biologische Vorbild zur Lösung des Problems nutzen? Erinnern Sie sich an eine Schlüsselsituation? Welcher Rolle spielte der Zufall?*
2. *Wo wurde die Entdeckung/Idee publiziert? Wie war die Resonanz? Von wem kam sie?*
3. *Wurde die Entdeckung/Idee patentiert?*

#### Personen

1. *Wer ist der "Eigentümer" dieser Idee? (Einzelperson oder eine Gruppe von Personen?)*
2. *Welche Person/Personengruppen waren an der Ideenfindung beteiligt? Welche Rolle spielten diese Personen? Gab es "Schlüsselpersonen"?*
3. *Wie wurde der Personenkreis zusammengeführt? Gab es "Vermittler"? Kannten Sie die Personen bereits vorher?*

#### Ergebnis

1. *Wie erfolgsversprechend/realisierbar erschien Ihnen die Idee am Anfang?*
2. *Wann erkannten Sie das „wahre“ Potential? Wie kamen Sie zu dieser Einschätzung?*
3. *Welche Hindernisse auf dem Weg zur Realisierung sahen sie damals?*

### Produktentwicklung

#### Personen

1. *Inwiefern waren Sie an der Produktentwicklung beteiligt?*
2. *Welche Person/Personengruppen waren in die Produktentwicklung involviert? Welche Rolle spielten diese Personen? Gab es "Schlüsselpersonen"?*
3. *Wie ist der Personenkreis zusammengekommen? Gab es "Vermittler"?*

**Arbeitsweise**

1. Wurden auch andere "traditionelle" Lösungsansätze verfolgt?
2. Was waren die Gründe einen "bionischen Lösungsansatz" zu nutzen? Wie und wann wurde diese Entscheidung getroffen?
3. Welche Hindernisse lagen einer Realisierung im Wege? Wie wurden diese überwunden?
4. War es notwendig, den Prozessablauf in der Produktentwicklung zu verändern (z. B. aufgrund neuer Kooperationspartner)?
5. War es notwendig, andere Methoden oder Werkzeuge einzusetzen?

**Kommunikation & Wissenstransfer**

1. War es notwendig, fachübergreifend Wissen zu übertragen? Wenn ja, wie geschah dies?
  - a) Inwiefern fanden während der Produktentwicklung „fachübergreifende Gespräche“ statt?
  - b) Erinnern Sie sich an Missverständnisse, die auf Unterschiede im fachlichen Hintergrund oder in der Arbeitsweise zurückzuführen waren? Wie wurden diese Kommunikationsprobleme überwunden?
2. Wie „neu“ war die Idee aus Sicht der Produktentwicklung?
  - a) Wie hoch war der Bedarf an detaillierten "fachfremden" Informationen?
  - b) Welche Werkzeuge wurden für Informationsbeschaffung genutzt?

**Ergebnis**

1. Wurde mit dem bionischen Ansatz ein "Durchbruch" erreicht?
2. In welcher Weise wurde die ursprüngliche Idee im Verlauf der Produktentwicklung verändert?
3. In welcher Weise hat die Entscheidung eine bionische Lösung zu nutzen, die Produktentwicklung positiv beeinflusst? Was gestaltete sich besonders einfach?
4. In welcher Weise hat die Entscheidung eine bionische Lösung zu nutzen, die Produktentwicklung negativ beeinflusst? Was war besonders schwierig?

**Produktherstellung****Personen**

1. Inwiefern waren Sie an der Produktherstellung beteiligt?
2. Welche Person/Personengruppen waren in die Produktherstellung involviert? Welche Rolle spielten diese Personen? Gab es "Schlüsselpersonen"?

3. *Wie ist der Personenkreis zusammengekommen? Gab es "Vermittler"? Kannten Sie die Personen bereits vorher?*

#### **Arbeitsweise**

1. *Inwiefern wurden neue Materialien eingesetzt?*
2. *Inwiefern wurden neue Fertigungsverfahren oder Werkzeuge eingesetzt?*
3. *Inwiefern wurden andere Marketingstrategien/Vertriebswege genutzt?*

#### **Ergebnis**

1. *In welcher Weise hat die Entscheidung eine bionische Lösung zu nutzen, die Produktherstellung positiv beeinflusst? Was gestaltete sich besonders einfach?*
2. *In welcher Weise hat die Entscheidung eine bionische Lösung zu nutzen, die Produktherstellung negativ beeinflusst? Was war besonders schwierig?*
3. *Inwiefern hat das biologische Vorbild das Produkt positiv beeinflusst?*
4. *Inwiefern hat das biologische Vorbild das Produkt negativ beeinflusst?*

### **Teil IV: Unternehmen/Umfeld**

1. *In welcher Form wurde das Produkt/Projekt gefördert? Gab es finanzielle Unterstützung? Gab es besondere "Handlungsfreiräume"?*
2. *In welcher Weise hat das "bionische Produkt", das Unternehmen und das Umfeld positiv beeinflusst?*
3. *In welcher Weise hat das "bionische Produkt", das Unternehmen und das Umfeld negativ beeinflusst?*

### **Teil V: Rückblick**

1. *Wenn sie heute in einer ähnlichen Situation wären, was würden Sie anders machen?*
2. *Wenn sie heute in einer ähnlichen Situation wären, was würden Sie erneut so machen?*