

Lehrstuhl für Produktentwicklung

# **Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens**

**Hans Michael Stricker**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c. H. Birkhofer  
Technische Universität Darmstadt

Die Dissertation wurde am 13.09.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.03.2006 angenommen.



*Ein Herrscher befiehlt den Wissenschaftlern seines Landes, das Wesen der Wissenschaft in einem einzigen Buch zusammenzufassen. Nach jahrelangen Erörterungen haben die Wissenschaftler ein dickes Buch geschrieben. Der Kaiser jedoch ist inzwischen alt geworden und erkennt, dass die Zeit nicht ausreicht, dieses dicke Buch zu verstehen.*

*Er befiehlt, das Wesentliche daraus so knapp wie möglich zusammenzufassen. Als nach Jahren das neue Buch fertig ist, fürchtet der Kaiser wegen seines hohen Alters, seine Zeit reiche auch nicht zum Verstehen dieses Büchleins, und deswegen befiehlt er seinem klügsten Wissenschaftler, den Inhalt des Buchs in einem einzigen Satz zusammenzufassen. Der weise Mann denkt lange nach und berichtet schließlich, er habe den einen Satz gefunden, um den der Kaiser gebeten habe.*

*Der Satz lautet: Die Welt ist kompliziert.*

*Märchen*

*Informationen sind nur so viel Wert, wie ihre Quelle.*

*Dan Brown*

*Wissen ist Macht.*

*Francis Bacon*



# **Vorwort des Herausgebers**

## **Problemstellung**

Die erfolgreiche Bearbeitung technischer Problemstellungen ist entscheidend für eine effektive und effiziente Produktentwicklung. Hierzu ist die Suche und Verarbeitung von Information als zentrales Kriterium zu betrachten. Da Menschen als denkende und handelnde Personen diese Informationen suchen und verarbeiten müssen, besteht aufgrund potenziell und latent falscher Beurteilungs- und Schlussfolgerungsprozesse eine Gefahr für ein Scheitern bei der Problemlösung. Zahlreiche Methoden berücksichtigen trotz eines hohen Potenzials für innovative Lösungen für technische Probleme zu wenig die Bedürfnisse der Anwender und riskieren dadurch eine nur geringe Anwendung in der industriellen Praxis. Hier werden methodische Hilfsmittel gefordert, die ein hohes Nutzen/Aufwand-Verhältnis besitzen.

## **Zielsetzung**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Faktor Mensch beim Umgang und der Arbeit mit Methoden in den Mittelpunkt zu rücken. Erkenntnisse der Kognitionspsychologie sind in die Beobachtungen des Methodeneinsatzes zu integrieren und kritisch zu erörtern. Die Ergebnisse sollen in Anforderungen an Methoden zur Vermeidung von Fehlern bei der Lösung technischer Probleme in Entwicklungsprozessen münden. Speziell für die Lösungssuche über biologische Phänomene soll basierend auf den abgeleiteten Ergebnissen eine Optimierung der methodischen Unterstützung erfolgen, die nicht zuletzt eine industrielle Nutzbarkeit einer angewandten Bionik ermöglicht.

## **Ergebnisse**

Neben der Ableitung allgemeiner Anforderungen an Methoden bezüglich der Erstellung, der Vermittlung und des Einsatzes von Methoden unter Berücksichtigung der Vermeidung von Fehlern, stellt das methodische Hilfsmittel der „Charakterisierenden Beschreibung“ speziell für das Lösen technischer Probleme mit Hilfe der Bionik ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit dar. Dieses lässt sich in bestehende bionische Vorgehensmodelle integrieren und ermöglicht eine frühzeitige, abstrakte Analyse bereits gefundener biologischer Phänomene aber auch eine problemspezifische Suche nach passenden Lösungsalternativen. Hierbei leistet eine Liste biologisch-technisch relevanter Parameter zusätzliche Unterstützung.

## **Folgerungen für die industrielle Praxis**

Die Sensibilisierung für die beim Problemlösen stattfindenden Denkvorgänge und für deren Einfluss auf Entscheidungs- und Handlungsschritte ermöglicht Entwicklern in Industrieunternehmen Prozesse besser durchzuführen und schließlich bessere Produkte zu erstellen.

Dies ist besonders bei der Anwendung von Methoden zur Problemlösung von entscheidender Bedeutung. Diese sind häufig nicht auf den Faktor Mensch, also den Methodenanwender als Individuum abgestimmt und können so in Verbindung mit weiteren Schwachstellen, wie beispielsweise einer nicht ausreichenden Methodenbeschreibung, leicht zu Fehlern führen. Durch eine Reflexion des eigenen Verhaltens im Denken und Handeln können falsche Beurteilungs- und Schlussfolgerungsprozesse erkannt und vermieden werden.

Die in dieser Arbeit beschriebene Optimierung der Bionik als angewandte Methode zur Lösung technischer Probleme erlaubt eine effektivere und effizientere Nutzung dieser Methode. Damit wird Anwendern in der industriellen Praxis das große Potenzial dieser Methode besser als bisher zugänglich gemacht.

## **Folgerungen für Forschung und Wissenschaft**

Diese Arbeit thematisiert kognitive Prozesse beim technischen Problemlösen in ihren vielen Facetten. Sie setzt dabei den Fokus auf das Entstehen von Fehlern bei Denk- und Handlungsvorgängen, beschreibt Ursachen und zeigt schließlich Möglichkeiten auf, Fehler frühzeitig und reflektiv zu erkennen und zu vermeiden.

Exemplarisch an der Methode der Angewandten Bionik demonstriert, zeigt diese Arbeit Schwachstellen vieler Methoden und damit das Optimierungspotenzial auf Seiten der Entwicklungsmethodikforschung bei der Entwicklung anwendungsgerechter Problemlösemethoden. Die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze ermöglichen darüber hinaus neue Impulse für die Ausbildung hoch qualifizierter Ingenieure.

Garching, im Mai 2006

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann  
Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München

## Danksagung des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München in den Jahren 2000 bis 2005.

Einen nicht unerheblichen Beitrag zum Entstehen dieser Arbeit leisteten Menschen, die mich auf diesem Weg begleiteten:

Mein besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Prof. Udo Lindemann. Vor allem für die Möglichkeit, meinen Weg gehen zu dürfen, für die stets konstruktive Kritik, für das Vertrauen und das Interesse an meiner Arbeit und für den „Blick über den Tellerrand“.

Herrn Prof. Herbert Birkhofer danke ich sehr für die Mitberichterstattung und die lehrreichen Gespräche. Bei Herrn Prof. Hartmut Hoffmann bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Besonders die Bamberger Projekttreffen waren für mich jedes Mal eine außergewöhnliche Inspiration. Hier möchte ich mich neben meinen beiden Prüfern vor allen bei Herrn Prof. Dietrich Dörner und Herrn Prof. Klaus Ehrlenspiel bedanken. Meinen allerherzlichsten Dank an Prof. Petra Badke-Schaub, die mir bei vielen kognitionspsychologischen Fragen auch über diese Treffen hinaus stets eine besonders wertvolle Unterstützung war.

Bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die sehr schöne Zeit. Der Zusammenhalt, die Hilfsbereitschaft und das ehrliche Feedback sorgten am Lehrstuhl für diese außergewöhnliche Atmosphäre und ließen enge Freundschaften entstehen. Stellvertretend vielen Dank an Bernhard, Pacco, Nik, Nadja, Holger und Frank. Jens und Philipp, Euch beiden ganz besonderen Dank für die kurzweiligen und spannenden Diskussionen und die besondere Zeit von Arco bis Waidhofen. Vielen Dank auch an die Studentinnen und Studenten, die mir bei meiner Arbeit eine große Hilfe und wertvolle Partner waren.

Der größte Dank gebührt jedoch meinen Eltern, die mir durch eine gewissenhafte Erziehung, große Liebe und Nachsicht dieses alles erst ermöglicht haben.

Vielen Dank!

München, im Mai 2006

Hans Michael Stricker

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Innovative Lösungen in der Produktentwicklung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung .....	1
1.2	Alltägliches in der Produktentwicklung.....	4
1.3	Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.4	Forschungsfragen .....	7
1.5	Abgrenzung der Arbeit.....	7
1.6	Erfahrungsgrundlage und wissenschaftliche Vorgehensweise .....	8
1.7	Aufbau der Arbeit .....	10
<b>2</b>	<b>Problemlösen in der Produktentwicklung .....</b>	<b>13</b>
2.1	Entwicklung von Produkten.....	13
2.2	Probleme als besondere Situationen bei der Produktentwicklung.....	14
2.2.1	Produktentwicklung als Problemlöseprozess.....	15
2.2.2	Problemarten .....	15
2.2.3	Probleme und Komplexität .....	17
2.3	Lösungssuche bei Problemen.....	18
2.3.1	Natürliches Vorgehen zur Problemlösung .....	20
2.3.2	Denken und Handeln zur Lösung von Problemen .....	22
2.3.3	Menschliche Voraussetzungen zur Problemlösung .....	24
2.4	Fehler als menschliches Schicksal .....	25
2.4.1	Fehler und Katastrophen .....	25
2.4.2	Fehler im Kontext des Handelns beim Problemlösen.....	26
2.4.3	Natürliche Verhaltensweisen als Ursache für Handlungs- und Denkfehler ....	31
2.4.4	Negative Auswirkungen von Fehlern .....	33
2.4.5	Positive Auswirkungen von Fehlern.....	34
2.5	Entwicklungsmethodik zur Problemlösung und Fehlervermeidung.....	35
2.5.1	Vorgehensmodelle .....	36
2.5.2	Methoden .....	39
2.6	Fallbeispiel.....	41
2.7	Die Schwierigkeit der richtigen Information zum Problem.....	44
2.7.1	Informationsbausteine.....	46
2.7.2	Wissenslücken.....	47
2.7.3	Wissen generieren.....	50
2.8	Fehlerrelevante Handlungen beim methodischen Vorgehen .....	52
2.9	Zusammenfassung.....	55

<b>3</b>	<b>Ansatz zur Fehlervermeidung bei der Arbeit mit Methoden.....</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>Analyse biologischer Phänomene und Effekte und deren Umsetzung in technische Systeme .....</b>	<b>63</b>
4.1	Bionik .....	63
4.2	Problemlösung mittels Bionik .....	66
4.2.1	Modellierung des bionischen Vorgehens für technische Problemstellungen...	68
4.2.2	Fallbeispiel .....	71
4.2.3	Klassifikation biologischer Systeme zur technischen Umsetzung .....	75
4.3	Biologische Systeme als Verursacher komplexer Handlungssituationen.....	77
4.3.1	Biologische Systeme sind komplexe Systeme .....	77
4.3.2	Wissen und Information zu biologischen Systemen.....	80
4.3.3	Fallbeispiel .....	81
4.3.4	Fehler und deren Ursachen bei der Anwendung einer Bionik.....	86
4.4	Ergebnisse der Umfrage „Bionik als Methode“ .....	88
4.5	Schlussfolgerungen für die Anwendung biologischer Systeme zur Lösung technischer Problemstellungen .....	88
<b>5</b>	<b>Hilfsmittel zur Unterstützung der Bionik als Methode bei Entwicklungstätigkeiten .....</b>	<b>93</b>
5.1	Randbedingungen zur Erstellung eines Hilfsmittels .....	93
5.1.1	Technische Voraussetzungen und Forderungen an eine bionische Methode ...	94
5.1.2	Biologische Randbedingungen .....	94
5.2	Das Hilfsmittel Charakterisierende Beschreibung .....	95
5.2.1	Die Grundgedanken der Charakterisierenden Beschreibung.....	95
5.2.2	Charakterisierende Beschreibung zur abstrakten Analyse biologischer Phänomene .....	97
5.2.3	Charakterisierende Beschreibung zur zielgerichteten Lösungssuche.....	105
5.2.4	Diskussion .....	107
5.3	Fallbeispiele.....	108
5.3.1	Optimierung eines Düsensystems für Staubsauger .....	109
5.3.2	Optimierung einer Einspritzdüse für Kraftstoffe.....	112
5.4	Zusammenfassung .....	113
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>115</b>
6.1	Zusammenfassung .....	115
6.2	Ausblick.....	117
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>119</b>

<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>131</b>
<b>9</b>	<b>Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung.....</b>	<b>137</b>

# 1 Innovative Lösungen in der Produktentwicklung

## 1.1 Einführung

Erfolgreiches Vorgehen in der Produktentwicklung ist in vielen Details bereits ausführlich erforscht: Es existieren Dissertationen und andere Publikationen zur Ziel- bzw. Problemklärung, zur Lösungssuche und -auswahl sowie zur Absicherung der Ergebnisse. Es wurden zahlreiche Vorgehensmodelle, Methoden und andere Hilfsmittel entwickelt, die in bestimmten Situationen des Produktentwicklungsprozesses das Denken und Handeln unterstützen.

Die Entwicklungsmethodik selbst ist ein umfangreiches Gebiet. Sie integriert auch Erkenntnisse maschinenbaufremder Disziplinen, um innovative Lösungen zu Problemstellungen bei der Entwicklung technischer Systeme<sup>1</sup> zu generieren. Dies ist vor allem dann zu empfehlen, wenn über ein übliches Vorgehen, beispielsweise der Anwendung häufig benutzter Methoden wie Brainstorming [OSBORN 1957], Benchmarking [CAMP 1994] oder durch die Anwendung von Konstruktionskatalogen [z. B. ROTH 1994, 1996, 2000, KOLLER 1985] für ein vorliegendes Problem keine befriedigende Lösung gefunden wird. Gerade dann, wenn die Bereiche der „Technik“ verlassen werden, entstehen für den Entwickler etwa durch die Notwendigkeit einer Adaption Schwierigkeiten, die über die Bearbeitung des eigentlichen technischen Problems hinausgehen. Diese liegen darin begründet, dass Wissen fehlt, weil eine oft entscheidende, sehr spezifische Information und ihr jeweiliger Kontext für den Suchenden nicht oder nur schwer zugänglich ist. Das Potenzial zur Innovation kann deshalb nicht ausgeschöpft werden, weil der Entwickler in diesen technikfremden Disziplinen nicht anwendergerecht unterstützt wird.

Ein Beispiel für ein Gebiet, welches dem Entwickler unzählige Ansätze für technische Lösungsmöglichkeiten bietet, ist die Biologie. Unter dem Begriff „Bionik“ populär vermarktet, wird sie häufig fälschlicherweise bereits als Methode oder Methodik zur Lösung technischer Problemstellungen über biologische Phänomene und deren Effekte bezeichnet. Von einer Unterstützung von Entwicklern bei ihrer Problembearbeitung war die Bionik über lange Zeit zu weit entfernt. GRAMANN [2004] entwickelte ein für Techniker sinnvoll anwendbares Vorgehensmodell, und bildete wesentliche Schritte ab. Dieses hebt sich von bestehenden bionischen Vorgehensmodellen durch eine deutlich verbesserte Anwendbarkeit in der Praxis ab, wie Erfahrungen in Fallstudien nachweisen konnten.

---

<sup>1</sup> Im Folgenden wird für diese Art von Problemen von „technischen Problemen“ bzw. „technischen Problemstellungen“ gesprochen, um die Lesbarkeit nicht unnötig zu beeinträchtigen.

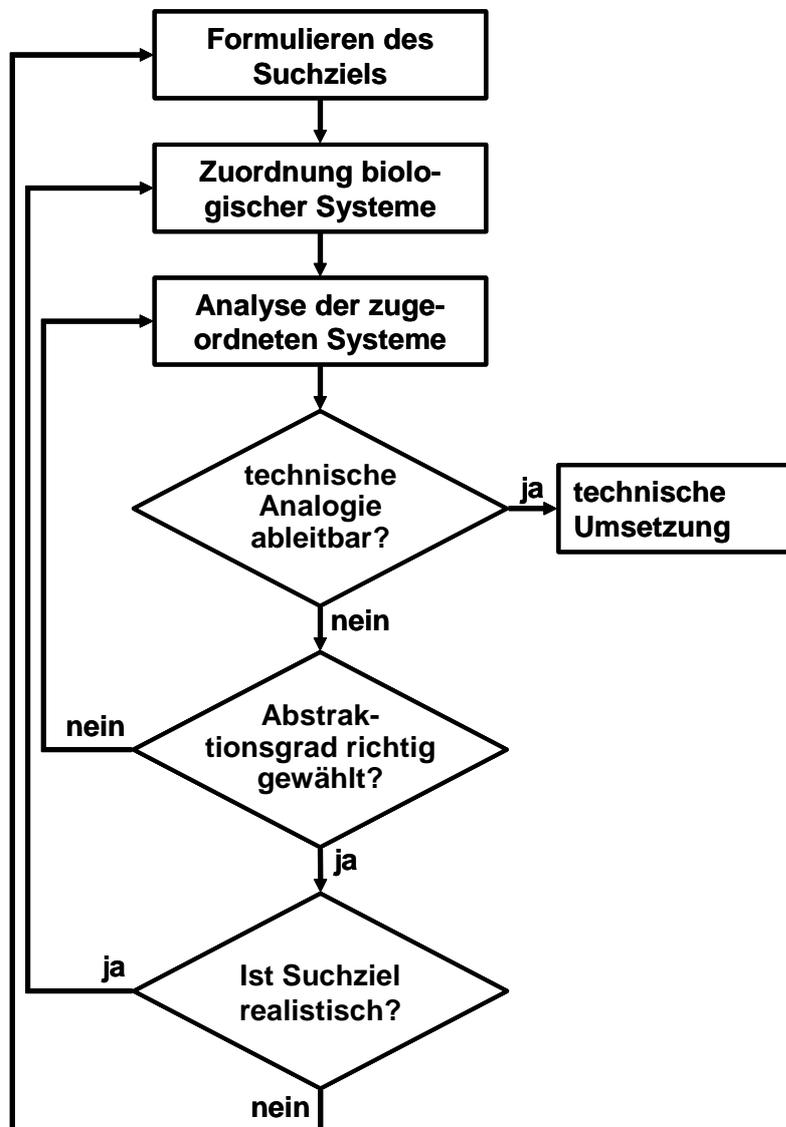


Abb. 1-1: Bionisches Vorgehensmodell [Gramann 2004]

Die Schritte des Bionischen Vorgehensmodells benennen die entscheidenden Handlungsphasen „Formulieren des Suchziels“, „Zuordnung biologischer Systeme“, „Analyse der zugeordneten Systeme“ und „technische Umsetzung“. Während er für die beiden ersten Phasen bereits unterstützende Hilfsmittel an die Hand gibt, fehlen für die Analyse biologischer Systeme sowie für deren technische Umsetzung geeignete methodische Vorgehensweisen.

Gerade die Analyse biologischer Systeme gestaltet sich schwierig. Ein durch Assoziation gefundenes biologisches Phänomen kann zum Lösen von Problemstellungen bei der Entwicklung technischer Systeme in den seltensten Fällen, im Grunde überhaupt nicht, einfach so kopiert werden. Es muss hinsichtlich seiner Wirkweise analysiert werden, um zu erkennen, was

im System für den nutzbaren Effekt verantwortlich ist. Um eine effektive Problemlösung zu betreiben, ist einzig die Übertragung dieses verantwortlichen Systemelements nötig und sinnvoll. Der Versuch, das biologische Gesamtsystem zu kopieren, garantiert nur einen erhöhten Aufwand, jedoch nicht den Erfolg der Umsetzung in ein technisches System. *Der Versuch der Kopie des Vogelflugs durch Nachahmung der schwingenden Flügel brachte den Menschen schließlich nicht die Luft, der Erfolg stellte sich erst ein, als man starre Tragflächen verwendete, die nur in ihrer Form dem Vogelflügel ähnlich waren.* [GIBBS-SMITH 1978 S. 13]

Das Erkennen des (oder der) für eine Wirkung verantwortlichen Parameter(s) ist die Schwierigkeit bei der Analyse biologischer Phänomene. An dieser Stelle nimmt die Biologie bezüglich ihrer Systeme sicherlich eine Sonderstellung gegenüber der Technik ein. Zum einen optimiert die Natur ihre Systeme ganzheitlich, das heißt, vom sichtbaren Gesamtkörper bis hin zur einzelnen Zelle existiert eine funktionelle Vernetzung hin zur Optimierung einer Gesamtfunktion. Was wiederum dafür sorgt, dass die tatsächliche Gestalt eines Elements aus der Notwendigkeit zur Erfüllung verschiedener Funktionen resultiert. Bei einer Optimierung dieser Systeme handelt es sich um evolutionäre Vorgänge, in ihrer Form meist zufällig stattfindende Mutationen mit gleichzeitiger Selektion. Diese bezieht sich immer auf die jeweiligen, sich aber über die Zeit ändernden Bedingungen des Systemumfelds. Zum anderen gibt es nur wenige ausreichende Informationen aus der biologischen Forschung, welche die „Funktionen“ biologischer Systeme beschreiben. Die Beschreibung klärt in den seltensten Fällen die Frage „warum etwas so funktioniert, wie es funktioniert“.

So bleibt es dem technisch ausgebildeten Menschen selten erspart, das biologische System in funktionaler Hinsicht selbst zu analysieren. Hier fehlt es an praxistauglicher Unterstützung. Durch diesen Mangel kommt es im Zusammenhang mit menschlichen Denk- und Handlungsweisen leicht zu Fehlentscheidungen, die den Erfolg bei der technischen Umsetzung eines biologischen Phänomens oder dessen Effekts gefährden. Wird der Wirkungsgrad einer methodischen Unterstützung als gering eingeschätzt, wird der Entwickler zu Recht deren Anwendung vermeiden.

Die Problematik bei der Lösungssuche über biologische Phänomene liegt weniger darin, dass keine Effekte für eine gesuchte technische Fragestellung existieren, vielmehr fehlt das Wissen, wie ein geeigneter Effekt zu finden ist und wie dieser überhaupt wirkt. Das Lösen technischer Probleme durch die Übertragung der den biologischen Phänomenen zugrunde liegenden Effekte effektiv und effizient zu unterstützen, ist in zweierlei Hinsicht möglich: zum einen durch die Unterstützung der Suche nach passenden Phänomenen; zum anderen durch die Unterstützung einer sinnvollen Analyse des wirkenden Effekts.

## 1.2 Alltägliches in der Produktentwicklung

In einem Projekt mit einem mittelständischen Unternehmen sollte die Methode TRIZ<sup>1</sup> [ALTSCHULER 1986] über Workshops vermittelt werden. Ziel war es, anhand der Bearbeitung einer konkreten technischen Problemstellung aus dem Produktportfolio, den Umgang mit der Methode zu erlernen und Stärken und Schwächen des Vorgehens zu erkennen. Den Mitarbeitern des Unternehmens standen Methodentrainer und -moderatoren zur Verfügung. Kennzeichnend für die Problembearbeitung war, dass diese parallel auch ohne die Methode TRIZ unternehmensintern bearbeitet werden sollte.

Bei einem Teilschritt der Methode TRIZ, der „Lösungssuche mittels technischer Effekte“ besteht die Möglichkeit, so genannte Effekte auch in biologischen Fachbüchern und Effektkatalogen zu suchen und daraus Lösungsalternativen zu generieren. Es zeigte sich, dass kreative Ideen bei der Betrachtung biologischer Phänomene besonders häufig auftreten. Interessanterweise wurde dennoch keine dieser scheinbar innovativen Ansätze schließlich als Lösung für das technische Problem umgesetzt, sondern ein konventioneller nicht biologisch basierter Ansatz. Es soll hier bewusst nicht die Qualität des technisch umgesetzten Lösungsansatzes diskutiert werden. Es stellt sich allerdings die Frage, ob die Suche im biologischen Umfeld sinnvoll und methodisch ausreichend unterstützt war oder ob die adäquate Nutzung eines biologischen Effekts an irgendeiner Stelle im Vorgehen, etwa durch zu frühes Abbrechen o. Ä., verhindert wurde.

Die Erfahrung aus diesem Projekt stellt keinen Einzelfall dar. In einem am Lehrstuhl für Produktentwicklung halbjährlich durchgeführten Praktikum, in dem jeweils zehn Studenten aus höheren Semestern eine konkrete Entwicklungsaufgabe hin zu einem abgesicherten Konzept umsetzen dürfen, lässt sich das gleiche Bild regelmäßig feststellen. Bereits bei der Vorauswahl von Lösungsalternativen durch die Bearbeiter, methodisch unterstützt etwa durch eine Vorauswahlliste nach PAHL/BEITZ [2004 S. 139], scheiden biologisch basierte Ansätze bei der Bewertung der Kriterien „grundsätzlich realisierbar“ und „Aufwand zulässig“ aus. Somit werden die Ansätze nicht weiterverfolgt [SCHWANKL 2002 S. 82]. Eine Ursache mag in der mangelnden Überzeugung von einer technischen Realisierbarkeit dieser Ansätze bei den Verantwortlichen liegen [WULF 2001 S. 77]. Es stellt sich die Frage nach den Hintergründen für dieses Denken und Handeln.

Um einen näheren Aufschluss über mögliche Gründe zu finden, müssen die Umstände näher betrachtet werden. In beiden Fällen sollten die Problembearbeiter unter Zeitdruck eine technisch funktionierende, das heißt, den Anforderungen entsprechende Lösung generieren. In beiden Fällen fehlten ihnen wichtige Informationen über

---

<sup>1</sup> TRIZ („Teorija Rešenija Isobretatelskih Zadač“): Russisch für: „Theorie zur Lösung von Erfindungsaufgaben“. Besonders geeignete Methode zur Lösung von Problemen bei bestehenden technischen Systemen.

- die Kohärenz eines biologischen Phänomens mit dem technischen Problem,
- die Funktionsweise und die Ursachen des biologischen Phänomens,
- die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung (differenzierende Merkmale) und
- die Realisierungssicherheit der technischen Lösung.

Den Bearbeitern fehlt entsprechendes Wissen, um Schlussfolgerungen zu ziehen oder Entscheidungen zu treffen. Der dafür ursächliche Mangel an benötigter Information macht eine Potenzialabschätzung biologischer Phänomene nahezu unmöglich. Ideen, die auf biologischen Phänomenen beruhen, werden daher nicht weiter verfolgt.

Mangelnde Information kann dazu führen, dass unterlassene und auch durchgeführte Handlungen, ebenso wie die dahinter liegenden Denkvorgänge, in der vorliegenden Situation falsch sind. Der Mensch als denkende und handelnde Person stellt damit für eine erfolgreiche Problemlösung genau wie für eine erfolgreiche Methodenanwendung einen ausschlaggebenden Faktor dar. Diesen Faktor gilt es bei der Entwicklung von Methoden zu berücksichtigen, möchte man eine erfolgreiche Methodendurchführung ermöglichen und Fehler bei der Anwendung vermeiden.

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Methoden sollen den Entwickler bei der Problemlösung effektiv und effizient unterstützen. Eine adäquate methodische Unterstützung der Lösungssuche für technische Probleme mit Hilfe der Biologie könnte sich wie folgt darstellen:

*Bei der Bearbeitung einer Problemstellung bei der Entwicklung eines technischen Systems möchte ein Entwickler, nachdem er beispielsweise mittels der Anwendung der intuitiv-assoziativen Galeriemethode kein zufrieden stellendes Lösungsprinzip bekommen hat, über eine Recherche im biologischen Umfeld versuchen, eine innovative technische Lösung zu erhalten. Durch eine dieser Recherche angepassten Problemspezifizierung schränkt er den Zielkorridor möglicher biologischer Phänomene seiner technischen Fragestellung entsprechend sinnvoll ein.*

*Nach der Anwendung einfacher Hilfsmittel, wie Effektkatalogen oder Assoziationslisten, gelangt er innerhalb kurzer Zeit zu einer überschaubaren Menge an biologischen Phänomenen, die einen Bezug zu seinem technischen Problem aufweisen.*

*Eine frühzeitige, abstrakte Analyse der Phänomene hinsichtlich des Problems, mit der dem Entwickler zur Verfügung stehenden biologischen Information, ermöglicht es ihm schnell, Phänomene mit starken Effekten und hoher Kohärenz zum vorliegenden Problem zu bewerten*

*und auszuwählen. Differenzierende Parameter ausgewählter Phänomene werden erkannt und können so für eine technische Umsetzung berücksichtigt werden.*

*Über diese methodische Unterstützung kann der Entwickler das erforderliche Wissen generieren, um die richtigen Entscheidungen zu treffen und so mithilfe eines biologischen Phänomens eine Problemstellung bei der Entwicklung technischer Systeme innovativ zu lösen.*

Der Blick in die Biologie mit dem Ziel der Nutzung dieser für eine technische Problemlösung kann als methodisches Vorgehen nur dann erfolgreich sein, wenn der Anwender den zu investierenden Aufwand dem erhofften Nutzen gegenüber als zulässig erachtet. Eine wiederholte Anwendung der Bionik im Rahmen der Lösungssuche wird es nur geben, wenn die Wahrscheinlichkeit ihres Erfolgs hoch ist [DAVEY ET AL. 1988]. In diesem Zusammenhang ist die Motivation eines Entwicklers zur Anwendung einer Methode entscheidend. Motivierte Entwickler mit positiver Erfahrung hinsichtlich erfolgreichen Methodeneinsatzes nutzen auch weiterhin gerne Methoden. Ein Dilemma entsteht, sollen nicht motivierte Entwickler von dem Wert einer Anwendung von Methoden überzeugt werden. Der Nutzen einer Methode lässt sich vor allem über erfolgreiche Methodenanwendung aufzeigen. Dies stellt allerdings einen „Circulus vitiosus“ dar: Jemand, der keine Methode anwenden wird, erkennt nicht den Nutzwert einer Methode. Durch die fehlende Erfahrung im Umgang mit Methoden ist im Einzelfall der Anwendung ein Scheitern auch wahrscheinlicher. Auch unterbleibt dann unter Umständen ein reflexives Denken, welches fehlerhaftes Verhalten erkennen lässt und den Entwickler zu einer Verhaltensänderung führen könnte. Ein entscheidender Baustein erfolgreichen Methodentransfers [RUTZ 1985, ZANKER 1999, HUTTERER 2005] ist also eine erfolgreiche Methodenanwendung. Die daraus folgende Hauptforderung an Methoden ist ein den Menschen unterstützender Aufbau. Das beinhaltet das Vermeiden von kritischen Stellen im Ablauf, die das Auftreten von Fehlern bei einer Anwendung zusätzlich provozieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Entwickler, der die Biologie zur Lösung eines Problems bei der Entwicklung technischer Produkte nutzen möchte, erfolgreich methodisch zu unterstützen. Dazu soll ein Hilfsmittel erstellt werden, das die zielgerichtete Suche nach biologischen Systemen sowie deren Analyse ermöglicht. Für die Erstellung dieser Methode sollen vor allem natürliche Verhaltensweisen sowie die Besonderheit dieser interdisziplinären Suche in der Biologie berücksichtigt werden, die zu Fehlern in der Anwendung der Methode oder zu falschen Ergebnissen führen, die den Erfolg der Methode verhindern. Der für eine Anwendung dieser Methode erforderliche Aufwand soll akzeptabel sein, um eine industrielle Verwendung zu ermöglichen.

## 1.4 Forschungsfragen

Aus der gegebenen Zielstellung leiten sich folgende Fragen ab:

- Welche ursächlichen menschlichen Verhaltensweisen führen zu Fehlern im Denken und Handeln beim Entwickeln im Allgemeinen und dem Lösen technischer Probleme im Speziellen und damit zu Misserfolgen bei der Anwendung von Methoden? Worauf ist bei der Generierung eines methodischen Hilfsmittels zu achten, um solche Fehler zu vermeiden und die Methodenanwendung erfolgreicher zu gestalten?
- Wie unterscheidet sich das Vorgehen bei der Lösungssuche für technische Probleme mit Hilfe der Biologie von einem Vorgehen ohne Verlassen der technischen Disziplin. Welche menschlichen Verhaltensweisen stellen hier ein besonderes Problem dar?
- Wie muss ein Hilfsmittel gestaltet sein, um Entwickler bei der Anwendung biologischer Phänomene zur Lösung technischer Probleme effektiv und effizient zu unterstützen? Wie lassen sich Phänomene aus technikfremden Bereichen, im Speziellen aus der Biologie, aufwandsarm und zielgerichtet finden? Wie lassen sich diese Phänomene effektiv analysieren, sodass eine Bewertung und Auswahl hinsichtlich der technischen Umsetzung einfach und sicher möglich ist?

Die Erörterung und Klärung dieser Fragen war die Aufgabe für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit.

## 1.5 Abgrenzung der Arbeit

Diese Arbeit soll die frühen Phasen des Produkterstellungsprozesses betrachten, in denen aus einer technischen Problemstellung heraus ein Konzept zu entwickeln ist. In das Münchener Vorgehensmodell (MVM) [LINDEMANN 2005 S. 39FF.] eingeordnet behandelt diese Arbeit insbesondere die Elemente „Ziel strukturieren“, „Lösungsalternativen suchen“ und „Eigenschaften ermitteln“ sowie „Entscheidungen herbeiführen“, in denen die Suche und die Analyse stattfinden sowie die Auswahl grundsätzlicher Lösungsmöglichkeiten auf einem noch relativ abstrakten Niveau. Im Fokus steht dabei das methodische Vorgehen bei der Betrachtung biologischer Phänomene zur Generierung prinzipieller Lösungsalternativen für technische Systeme.

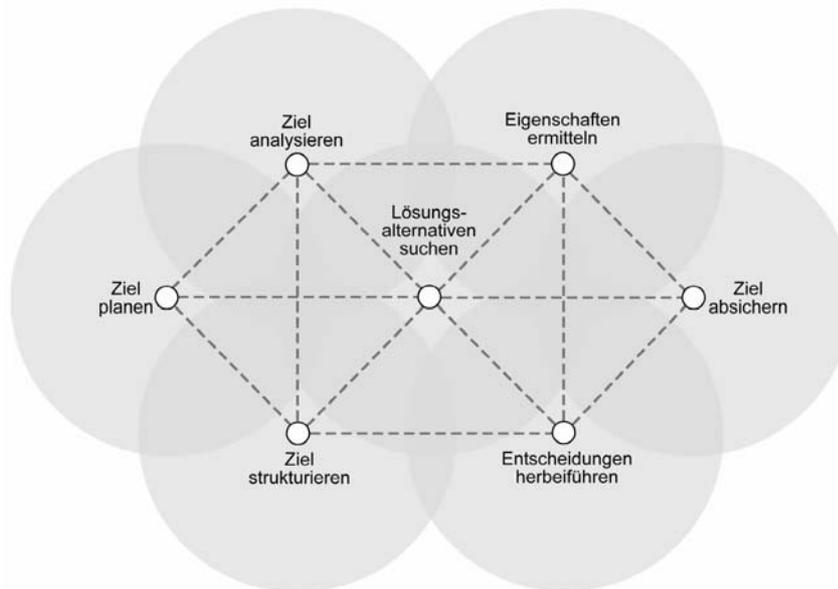


Abb. 1-2: Phasen des Entwicklungsprozesses im Münchener Vorgehensmodell [LINDEMANN 2005 S. 39FF.]

Ein zweiter Schwerpunkt der Arbeit ist die Betrachtung der Personenmerkmale des Entwicklers. Hier fokussiert die vorliegende Arbeit menschliches Verhalten, welches zu Denk- und Handlungsfehlern bei einer Methodenanwendung im Allgemeinen und der Lösungssuche für technische Probleme über die Natur im Speziellen führt. Dabei sollen Entwickler in ihrem Handeln als Einzelpersonen betrachtet und gruppenspezifische Effekte ausgeklammert werden. Unternehmerisch-organisatorische oder zwischenmenschliche Probleme werden in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

## 1.6 Erfahrungsgrundlage und wissenschaftliche Vorgehensweise

Die Basis dieser Arbeit bilden Erfahrungen, die der Autor in Projekten mit Unternehmen und als Betreuer von Praktika, Semester- und Diplomarbeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Fakultät für Maschinenwesen an der Technischen Universität München gesammelt hat. Ziel der Forschungsprojekte in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industrieunternehmen war die Weiterentwicklung von Methoden und Prozessen zur Entwicklung innovativer Produkte sowie zur Minimierung der Herstellkosten bereits existierender Produkte.

Über die Reflexion der Prozesse bei der Problembearbeitung im betrieblichen und universitären Umfeld konnte der grundsätzliche Bedarf an methodischer Unterstützung besonders unter

den Aspekten der Effizienzsteigerung und der Fehlervermeidung festgestellt werden. Insbesondere bei der Recherche in technikfernen Disziplinen konnten dabei verstärkt Schwierigkeiten der Bearbeiter festgestellt werden. In diesem Bereich bietet die Entwicklungsmethodik bisher wenig Unterstützung, doch gerade hier fehlt den meisten Entwicklern nötiges Wissen, um zu Erfolg versprechenden Ergebnissen zu kommen.

Im Folgenden werden die in der vorliegenden Arbeit zitierten oder auf diese Einfluss nehmende Projekte kurz vorgestellt:

- Bei einem Zulieferbetrieb für automatisch wirkende Türen für Schienenfahrzeuge war die Aufgabe geeignete Methoden und Prozesse zu generieren, um produktportfolio- und prozessseitig Herstellkosten zu senken und Werte zu steigern.
- In einem Folgeprojekt im gleichen Unternehmen wurde eine Produktgruppe über eine Baukastenentwicklung unter Kosten- und Funktionsaspekten methodisch unterstützt optimiert.
- In einem Teilprojekt des Transferprojekts TFB 29 TP 4 wurden Prozessmodelle und Methoden erstellt und umgesetzt, um eine integrierte Planung kostenoptimierter, modularer Montagesysteme in der Praxis zu ermöglichen.
- Am Beispiel der Optimierung einer komplexen zentralen Baugruppe einer Luftwebmaschine fand eine unternehmensspezifische Adaption sowie der Transfer der Methode TRIZ und der Lösungssuche mittels biologischer Effekte in das Unternehmen statt.

Verschiedene betreute Studienarbeiten trugen ebenfalls ihren Teil zu dieser Arbeit bei:

- Analyse menschlich begründeter Fehler und ihrer Ursachen (Markus Panhuber)
- Entwicklung eines Abstraktionsschemas zur Analyse biologischer Teilsysteme (Helene Retzer)
- Biologisch unterstützte Lösungssuche für technische Probleme - eine Untersuchung verschiedener methodischer Vorgehensweisen (Florian Denk)
- Optimierung technischer Systeme durch biologische Phänomene (Nora Schmidt)
- Analyse und Optimierung eines Versuchsträgers zur osmotischen Druckerzeugung (Michael Großhauser)

Die Erkenntnisse, welche als Lösungsansätze für das methodische Vorgehen bei der Lösung technischer Probleme durch biologische Phänomene entwickelt wurden, wurden in den folgenden Studienarbeiten angewendet und verifiziert:

- Entwicklung eines neuen Konzepts zur Optimierung der Partikelaufnahme von Staubsaugdüsen mithilfe von Bionik (Michael Hombauer)

- Optimierung strömungsmechanischer Elemente auf Basis biologischer Vorbilder (Marina Wittenzellner)
- Analyse biologischer Systeme vor dem Hintergrund der technischen Umsetzbarkeit (Katharina Kaiser)

## 1.7 Aufbau der Arbeit

Die Gliederung der vorliegenden Arbeit orientiert sich an der oben angesprochenen Problemstellung, der Zielsetzung sowie den Forschungsfragen und ist in der folgenden Abbildung zur Übersicht dargestellt.

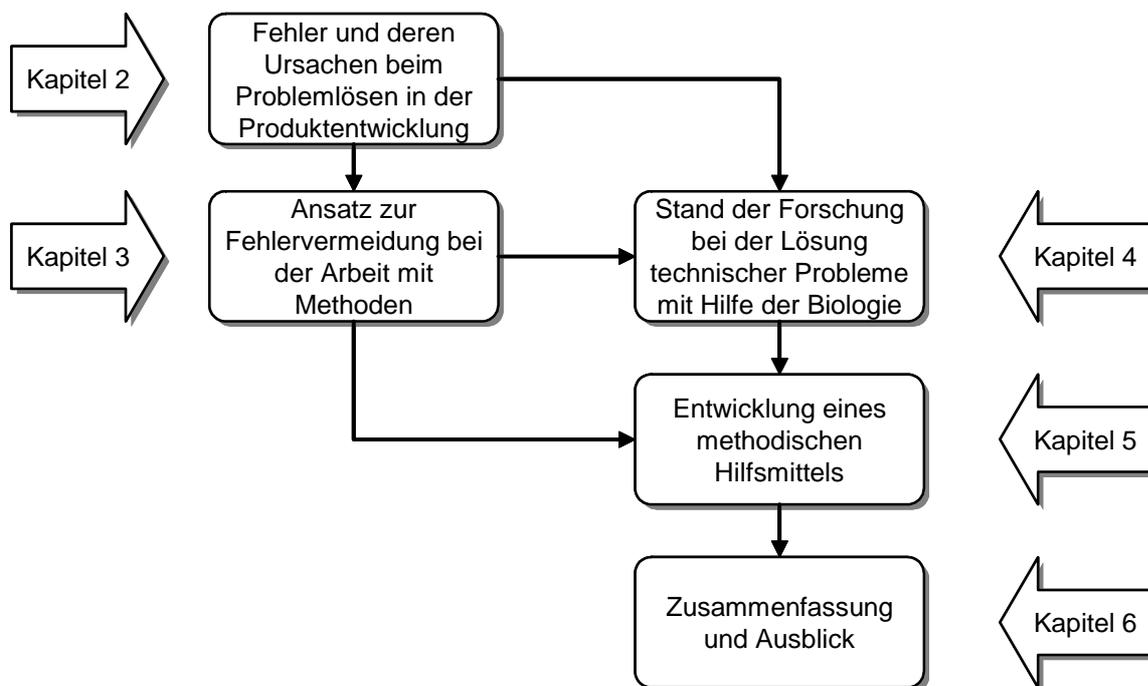


Abb. 1-3: Aufbau der Arbeit

In **Kapitel 2** wird das Auftreten von Fehlern beim Lösen technischer Probleme in Produktentwicklungsprozessen untersucht. Es werden verschiedene Arten von Problemen, die bei der Entwicklung von Produkten auftreten, spezifiziert sowie Vorgehen zur Lösungsgenerierung vorgestellt. In diesen Kontext werden die Gründe sowie die daraus folgenden menschlichen Verhaltensweisen gebracht, die als Ursache für Fehler gesehen werden müssen. Sie stellen auch eine Ursache für fehlerhafte Methodenanwendung dar.

Daraus wird in **Kapitel 3** abgeleitet, welche Anforderungen eine Methode zum Lösen technischer Probleme erfüllen muss, um zur Vermeidung von verhaltensspezifischen Fehlern bei ihrer Anwendung beizutragen. Diese Anforderungen stellen die Voraussetzung für das im weiteren Verlauf der Arbeit zu generierende methodische Hilfsmittel zur Unterstützung des Lösens technischer Probleme über die Natur dar.

In **Kapitel 4** befasst sich der Autor mit dem Stand der Forschung zur Suche und Analyse biologischer Phänomene und deren Umsetzung in technische Systeme. Neben den besonderen Randbedingungen, die für ein solches Vorgehen vorherrschen, werden existierende Ansätze vorgestellt, die diesen Prozess bereits unterstützen sollen. Mittels Fallbeispielen werden besondere Schwierigkeiten bei der Informationssuche und -verarbeitung im Bereich der Biologie abgeleitet und formuliert.

Im folgenden **Kapitel 5** wird mit der „Charakterisierenden Beschreibung“ ein in das in Kapitel 4 untersuchte Vorgehen integrierbares methodisches Hilfsmittel beschrieben, das Entwickler bei der Lösung technischer Probleme durch biologische Phänomene und deren Effekte zuverlässig unterstützt. Typische Fehler können dadurch vermieden oder deutlich verringert werden. Dieses Hilfsmittels ermöglicht eine zielgerichtete Suche nach Phänomenen sowie eine optimale Analyse und Bewertung der Phänomene hinsichtlich der zu erfüllenden technischen Funktion mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Information. In Fallbeispielen wird der Ansatz schließlich überprüft und kritisch diskutiert.

In **Kapitel 6** finden sich schließlich die Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit. Weitere Ansätze zur Verbesserung der Anwendung einer Methode Bionik für Produktentwickler werden in einem Ausblick aufgezeigt.



## 2 Problemlösen in der Produktentwicklung

*In diesem Kapitel sollen die Voraussetzungen zur Entwicklung eines methodischen Hilfsmittels und seiner erfolgreichen Anwendbarkeit erörtert werden. Bei der Entwicklung von Produkten finden sich die Entwickler – etwa aufgrund der Neuartigkeit der Aufgabe oder einem Zielkonflikt – fast schon im Regelfall mit Problemen konfrontiert. Wie diese Probleme gelöst werden und welche methodische Unterstützung dabei möglich ist, wird vor allem hinsichtlich der Vermeidung von Fehlentscheidungen diskutiert. Durch die Anwendung von Vorgehensmodellen und Methoden versuchen Entwickler, menschlichen Schwächen zu begegnen und so Fehler zu vermeiden und ihre Prozesse zu optimieren. Denk- und Handlungsfehler sowie ihre Folgen und Ursachen sind darüber hinaus nicht nur für eine effektive und effiziente Anwendung sondern auch für eine erfolgreiche Generierung von Entwicklungsmethoden relevant. Anhand eines Fallbeispiels, bei dem das Verhalten eines Entwicklers betrachtet wird, werden Schwierigkeiten im methodischen Vorgehen abgeleitet und Defizite von methodischen Hilfsmitteln aufgezeigt.*

### 2.1 Entwicklung von Produkten

Produkte sind Teil unseres Lebens. Jeden Tag nutzen wir zahllose Produkte, deren Anwendung für uns in der Regel so selbstverständlich ist, dass wir nach ihrer Herkunft und ihrer Entstehung meist nicht fragen. Ihr Zweck ist die Unterstützung der Erfüllung der Bedürfnisse von Menschen. Dabei sind Produkte heutzutage meist deutlich komplexer als etwa der Faustkeil, der vielleicht eines der ersten Produkte der Menschheit darstellt. Er verhalf zu einer erfolgreicherer Jagd und befriedigte damit das Bedürfnis des Überlebens. Erfüllen verschiedene Erzeugnisse die gleichen Bedürfnisse auf funktioneller Ebene, so kann mitunter die Erfüllung eines Geltungsbedürfnisses zum Zweck werden. In diesem Fall besitzt die Marke und das Design eine deutlich höhere Priorität als die Erfüllung der ursprünglichen Funktion. Um die Entwicklung technischer Produkte als eine spezielle Form von Sachgütern soll es hier im Weiteren gehen.

Technische Produkte durchlaufen einen Lebenszyklus [PAHL/BEITZ 2004 S. 144]. Darunter sind nicht nur die den Kunden unmittelbar bekannten Lebensphasen [EHRLENSPIEL 2003 S. 43] zu verstehen, wie die Zeitspanne vom Kauf, über die Nutzung bis zur anschließenden Außerbetriebnahme, Weiterverwertung oder -verwendung eines Produktes. Bevor ein Produkt auf dem Markt erworben werden kann, muss es aus einem Bedürfnis oder einer Idee heraus geplant, entwickelt und schließlich produziert werden. Die Produktentwicklung nimmt als der das Produkt definierende Prozess eine zentrale Stellung bei der Erstellung

von Produkten und damit im Lebenszyklus eines Produktes ein [EHRENSPIEL 2003 S. 130]. In dieser Phase, in der die Voraussetzungen für das spätere Produkt festgelegt werden, sind zahlreiche Handlungen notwendig. Dabei handelt es sich beispielsweise um die Klärung der (Produkt-)Ziele, um die Ableitung von Anforderungen an das Produkt, um das Erarbeiten von Lösungsalternativen, deren Bewertung und Auswahl sowie um die Absicherung von Entscheidungen. Durch sinnvoll kombiniertes und zum Teil wiederholtes Anwenden dieser Schritte auf unterschiedlich abstraktem Niveau werden die etwa bei PAHL/BEITZ [2004 S. 168] genannten vier Hauptphasen einer Entwicklung (Planen und Klären der Aufgabe, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten) durchlaufen. Damit wird eine Idee zu einer Produktdokumentation hin konkretisiert, die anschließend durch eine Fertigung materielle Gestalt erhält. Unabhängig davon, ob es sich dabei um eine Neuentwicklung oder um eine Änderung bestehender Produkte (Varianten- bzw. Anpassungsentwicklung) handelt – die Produktentwicklung ist in erster Linie ein gedanklicher Prozess! Bedürfnisse und Wünsche von Kunden sind in Anforderungen an das Produkt, in Funktionen und schließlich in ein funktionierendes Produkt zu übersetzen. Im gesamten Prozess sind vom Entwickler Fakten- und Methodenwissen sowie heuristische Kompetenz gefragt [EHRENSPIEL 2003 S. 51].

Die Globalisierung der Märkte und deren Dynamisierung zwingen Unternehmen, immer schneller Produkte auf den Markt zu bringen [GAUSEMEIER ET AL. 2004 S. 4]. Diese müssen sich von Vorgängerprodukten abheben und sollen stetig besser werden. Unter diesen Voraussetzungen wächst mit Streben nach Innovation ständig auch der Anspruch an den Entwickler. So ist es nicht verwunderlich, dass der Mensch mit seinem Denken und Handeln zunehmend im Mittelpunkt der Forschung im Bereich der Entwicklungsmethodik steht. Die Arbeitspsychologie trägt mit ihren Erkenntnissen zur Optimierung der Produktentwicklung bei [HACKER ET AL. 2002] und unterstützt die Reduzierung menschlich begründeter Fehler in Entwicklungsprozessen.

## **2.2 Probleme als besondere Situationen bei der Produktentwicklung**

Produktentwickler haben die Aufgabe Produkte zu entwickeln, die den Wünschen und Bedürfnissen potenzieller Nutzer möglichst ganzheitlich entsprechen und dem Unternehmen Erlöse und damit Marktanteile und langfristigen Erfolg sichern. Diese Aufgabe ist nicht problemlos durchführbar. Ziele können unklar sein („...Wie soll das Produkt aussehen?“), ebenso kann auch unklar sein, wie diese Ziele zu erreichen sind. Es sollen Ziele erreicht werden, die sich beispielsweise widersprechen oder aus einer unüberschaubaren Menge an Anforderungen abzuleiten oder teilweise noch nicht explizit ausgesprochen sind. Auch sind in Situationen mit geringem Wissensstand und mangelnder Information ständig Festlegungen zu treffen, deren

Auswirkungen oft erst spät im Prozess sichtbar werden. Die Erfüllung von Kosten-, Zeit- und Qualitätszielen kann für den Entwickler schließlich Problemcharakter aufweisen. In den folgenden Kapiteln sollen Probleme in Produktentwicklungsprozessen näher betrachtet werden.

### 2.2.1 Produktentwicklung als Problemlöseprozess

Viele Handlungen im Entwicklungsprozess sind für Entwickler Routinetätigkeiten. Gerade erfahrene Produktentwickler können ein großes Spektrum anfallender Aufgaben mit Hilfe vorhandenem Wissen aus ähnlich abgelaufenen Prozessen lösen. Dabei können sowohl das (Sach-)Wissen über konstruktive Parameter, auch deklaratives Wissen genannt, als auch das (Prozess-)Wissen über die Art des Vorgehens, prozedurales Wissen, zur Lösung einer Aufgabe genutzt werden [RYLE 1949]. Meist werden die Handlungen nur teilweise bewusst ausgeführt und in der Regel auch nicht hinterfragt, solange sie erfolgreich ablaufen. Dieses intuitive Vorgehen der Anwendung von gespeicherten Handlungssequenzen ist üblicherweise höchst effizient, da es schnell und sicher abläuft.

Besondere Situationen stellen sich für den Produktenwickler dar, wenn die Lösung, d. h. das Ziel einer Aufgabe oder das Vorgehen, wie diese Aufgabe zu lösen nicht bekannt ist. Die Häufigkeit des Auftretens solcher Situationen in Entwicklungsprozessen ist bei der großen Anzahl unterschiedlicher Produkte und Anwendungen nachvollziehbar. Die Tätigkeit des Entwickelns ist schließlich das Erschaffen von etwas Neuem. Wie soll also etwas bekannt sein, was zu erschaffen ist? Dadurch besitzen konstruktive Aufgabenstellungen per se Problemcharakter. Sie können Problemstellungen beinhalten oder auf diese Weise sogar selbst zu einem Problem werden. Aus diesen Gründen muss das Entwickeln als Problemlöseprozess verstanden werden [FRICKE 1993 S. 11; BADKE-SCHAUB ET AL. 2004, S. 21].

### 2.2.2 Problemarten

Um jedoch die Frage beantworten zu können, wie Probleme effektiv zu handhaben und zu lösen sind, ist es wichtig, sich mit ihrem besonderen Charakter näher zu befassen. Griechische Philosophen beschrieben ein Problem<sup>1</sup> als etwas, was unsere Verwunderung erregt [POPPER 2002 S. 15]. Jedoch wird ein Problem nicht immer bewusst als ein solches erkannt, wenn es latent im Vorgehen vorhanden ist. Dies birgt natürlich ein hohes Fehlerpotenzial für nachfolgende Handlungen. In der Forschung ist es vor allem die kognitive Psychologie, die den Begriff Problem für Denk- und Handlungsprozesse definiert hat [DUNKER 1974, DÖR-

---

<sup>1</sup> Aus dem Griechischen „problema“ bedeutet ursprünglich: „Hindernis, Bollwerk“, im übertragenen Sinne auch: „Streitfrage, zweifelhafte Frage“ nach „proballein“: „Vorwärts werfen, hinwerfen, entgegenstellen“ [WAHRIG, 2002]

NER 1987, HACKER 1998 U.A.]. Die dort darlegte Sicht auf Probleme ist inzwischen in der Entwicklungsmethodikforschung anerkannt und etabliert:

Ein Problem ist dadurch definiert, dass zwischen einem Anfangs- und einem Zielzustand eine Barriere existiert, die entweder durch eine unklare Zielstellung oder durch einen unklaren Weg zur Zielerreichung (Mittel) gekennzeichnet ist. Die Barriere unterscheidet das Problem auch von einer Aufgabe. Dörner beschreibt Probleme über die verschiedenen Arten bestehender Barrieren [DÖRNER 1987 S. 14] und unterscheidet dabei vier Problemtypen [hier in Anlehnung an BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 UND EHRENSPIEL 2003]:

- **Synthese- bzw. Mittelproblem/Synthesebarriere:** Bei dieser Art von Problem verhindert die Barriere, ein unter Umständen bekanntes Ziel zu erreichen, weil die Mittel zur Zielerreichung, auch als Operatoren bezeichnet, nicht bekannt sind. Beispielsweise könnte ein Syntheseproblem schon aus einer Forderung der Unternehmensführung zur Kostensenkung eines bestehenden Serienprodukts um 30 Prozent resultieren.
- **Dialektisches bzw. (Ziel-)Problem/dialektische Barriere:** Ist unabhängig von den Operatoren der Zielzustand unklar, so besteht ein dialektisches Problem. Dabei kann es zum einen möglich sein, dass Ziele überhaupt nicht bekannt sind. Ebenso besteht die Möglichkeit, dass Ziele zwar formuliert, aber so unscharf festgelegt wurden, dass sich ein Problem sogar zwangsläufig ergeben muss. Zum Beispiel gestaltet sich das Reduzieren der Lautstärke eines Rasenmähers problematisch, wenn Ist-Werte nicht ermittelt werden können und so eine quantitative Angabe fehlt, die als Basis für einen geringeren und eindeutigen Zielwert dienen könnte. DÖRNER [2004 S. 58 FF] zählt neben unkonkreten Zielen auch globale, vielzahlige (Politelie) und vernetzte Ziele als potenzielle Ursache für dialektische Probleme auf.
- **Ziel- und Mittelproblem/dialektische und Synthesebarriere:** Ist die Barriere sowohl durch eine geringe Klarheit der Zielkriterien sowie durch einen geringen Bekanntheitsgrad der Mittel beschreibbar, so handelt es sich um einen dritten Problemtyp. Dieser stellt ein gleichzeitiges Auftreten der beiden bisher genannten Typen dar.
- **Interpolationsproblem/Interpolationsbarriere:** Sind die Ziele und die Mittel zur Erreichung dieser Ziele klar, so könnte man eigentlich von einer Aufgabe sprechen. Tatsächlich entsteht ein Problem der Interpolation, sobald die Zahl möglicher Operatoren und in Folge die Zahl ihrer möglichen Kombinationen so groß wird, dass sie nicht mehr überschaubar ist. So kann bei dem Wunsch nach einem optimalen Gesamtkonzept die Kombination zahlreicher Teillösungsalternativen für viele vernetzte Teilfunktionen ein Interpolationsproblem darstellen. Das Schachspiel etwa beschreibt ein Interpolationsproblem. Aus-

gangssituation und Ziel sind eindeutig und den Spielern bewusst, dennoch gibt es nahezu unendlich<sup>1</sup> viele Kombinationen, dieses Ziel zu erreichen.

Welcher Art das Problem ist, das sich dem Entwickler stellt, lässt keine Aussage über die Schwierigkeit des Problems zu. Jedoch lässt sich daraus ein möglicher Lösungsweg ableiten. Sind Ziele unklar, müssen diese geklärt werden, ist der Weg nicht bekannt, können präskriptive Vorgehensmodelle und Methoden helfen, einen Weg zu wählen und so ein Ziel zu erreichen.

### 2.2.3 Probleme und Komplexität

Ob eine Situation ein Problem darstellt, ist vor allem eine subjektive Bewertung der handelnden Person und daher abhängig von Personenmerkmalen. Die gleiche Situation kann von zwei verschiedenen Personen unterschiedlich interpretiert werden: Für einen praxisorientierten Produktentwickler, der sich als langjähriger Mitarbeiter in seinem Unternehmen allerdings zum ersten Mal mit einem Projekt zur Kostensenkung konfrontiert sieht, mag diese Situation nachvollziehbar ein Syntheseproblem darstellen. Im Gegensatz dazu wird ein methodisch geschulter Ingenieur, selbst wenn ihm die Erfahrung mit den Produkten und Prozessen im Unternehmen fehlen, die gleiche Situation als eine Aufgabe betrachten, weil er das notwendige prozedurale Wissen während einer Vorlesung aufgenommen und verinnerlicht hat. Nach mehreren gleichartigen Projekten wird dieser Ingenieur eine Vielzahl zur Lösung der Aufgabe nötiger und bisher im Rationalbetrieb bearbeiteter Denk- und Handlungsschritte automatisiert und damit unbewusst im Normalbetrieb abarbeiten. Diese Handlungen sind damit Routine geworden. Aus diesem Beispiel lässt sich schließlich ableiten, dass in diesem Kontext „Wissen“ ein entscheidender Faktor bei der Betrachtung von Problemen darstellt. Wissensmangels kann daher als die Ursachen für die Entstehung von Problemen gesehen werden.

Zur Klassifikation von Problemen beschreibt Ehrlenspiel verschiedene Merkmale als Einflussgrößen [EHRENSPIEL 2003 S. 49]. Unter den Begriff **Mittelmerkmale** als Personen-, Gruppen- bzw. Unternehmensmerkmale werden Faktenwissen, Methodenwissen sowie heuristische Kompetenz zusammengefasst. Als weitere Merkmale werden **Objektmerkmale** genannt, die sich in Objektgebiet, -umfang und -komplexität untergliedern lassen sowie **Zielmerkmale** und **Zeitmerkmale**. Für die Objektkomplexität sowie Zielmerkmale gelten die gleichen Variablen, die meisten hat Dörner auch schon als allgemeine Merkmale komplexer Handlungssituationen definiert [DÖRNER 2004 S. 58]. Diese sind im Einzelnen:

---

Die Zahl der theoretisch möglichen Stellungen wird auf  $2 * 10^{43}$  geschätzt, die Zahl der möglichen Spielverläufe ist noch einmal um ein Vielfaches größer, wahrscheinlich größer, als die Zahl der Atome im Universum. [WIKIPEDIA 2005A]

- **Anzahl:** Die Anzahl der Parameter eines Systems oder Ziele, die in einem Realitätsausschnitt gleichzeitig beachtet werden müssen.
- **Vernetztheit:** der Grad der gegenseitigen Beeinflussung und Abhängigkeit dieser Parameter oder Ziele. Je größer die Anzahl von Variablen und je höher deren Vernetzungsgrad ist, desto größer ist die Komplexität.
- **Intransparenz:** Nicht alle Variablen und Vernetzungen in einem System sind sichtbar. Für Entscheidungen von Nachteil ist es, wenn relevante Informationen Teile solcher unsichtbaren Bereiche sind.
- **Dynamik:** Die von der Handlung unabhängige Weiterentwicklung eines Systems bedeutet die ständige Veränderung einer Situation und erzeugt in erster Linie Zeitdruck für den Handelnden.

Zeitmerkmale sind Zeitdruck aufgrund nicht zur Verfügung stehender Bearbeitungszeit [BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 S. 19 FF], aber auch der Zeitpunkt der Bearbeitung selbst.

Komplexe Handlungssituationen bzw. das Auftreten von Problemen im Produktentwicklungsprozess können sich unter bestimmten Voraussetzungen zu so genannten Kritischen Situationen ausweiten, wenn in diesen Situationen für weiteren Prozess richtungsweisende Entscheidungen zu treffen sind [BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 S. 68, STROHSCHNEIDER 2003]. Kritische Situationen sind nicht auf bestimmte Phasen des Produktentwicklungsprozesses beschränkt und bedürfen besonderer Beachtung, sollen Fehlentscheidungen vermieden werden. Kritische Situationen können ebenso wie Probleme bewusst erkannt werden. Bleiben sie der handelnden Person aber verborgen, kann das schließlich zu einem Fehlverhalten oder sogar zu einer Krise führen.

## 2.3 Lösungssuche bei Problemen

Auf einer Wanderung kann etwa ein zu überquerender Fluss eine solche Barriere darstellen. Kennt man keinen Weg über diesen Fluss, so besteht ein Problem. Dem Leser fallen sicherlich spontan Lösungsmöglichkeiten ein, wie etwa zu schwimmen, ein Boot zu bauen oder sogar bei entsprechend geringer Tiefe durch den Fluss zu waten. Diese Alternativen bergen jedoch wiederum weitere Problemstellungen, etwa die Fragen, wie tief eigentlich der Fluss ist, wie ein entsprechendes Boot zu bauen wäre oder wie man beim Schwimmen trocken bleiben soll. Ohne die jeweilige Information lassen sich die bereits gefundenen Lösungsmöglichkeiten nicht auf das Problem anwenden.

Findet sich, etwa nach einem Blick in die Landkarte, in geringer Entfernung eine Brücke, so löst sich in diesem Moment das Problem auf. Alle (scheinbar nicht optimalen) Lösungsalter-

nativen werden üblicherweise nicht mehr weiterverfolgt, da eine passende Lösung gefunden wurde. Probleme lösen heißt, das Wissen zu generieren, wie bestimmte Ziele zu erreichen sind<sup>1</sup>.

Ähnlich verhält es sich beim problemlösenden Handeln bei Entwicklungstätigkeiten. Sobald eine Lösung gefunden ist, die auf das vorliegende Problem zu übertragen ist, gilt dieses als gelöst. Entwickler sind grundsätzlich dazu geneigt, „aufkommende Lösungsideen möglichst schnell zu konkretisieren, weil dieses Vorgehen der eigenen Person wie auch der Umwelt den Eindruck vermittelt, „etwas fertig gestellt zu haben“. Dabei verschafft die Ausarbeitung und Anpassung einer Lösungsidee motivational mehr Befriedigung als die „kognitive Handhabung mehrerer paralleler Lösungsideen.“ [BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 S. 116]. In den meisten Fällen allerdings führt die Möglichkeit der Auswahl aus verschiedenen Lösungsalternativen zu hochwertigeren Lösungen für ein Problem. Um ein Problem erfolgreich zu bearbeiten, ist jedoch zumindest eine Lösung notwendig, die eine existierende Barriere auf akzeptable Weise überwindet.

Zu einer meist erfolgreichen Problemlösung kam schon Leonardo da Vinci. Als einer der bekanntesten Wissenschaftler und ein Multitalent hat er, was weit weniger bekannt ist, als Militäringenieur für verschiedene Dienstherrn zahlreiche vor allem kriegsrelevante Erfindungen entwickelt [GIBBS-SMITH 1978 S. 8 FF]. Zu unzähligen Problemen fand er für die damalige Zeit erstaunlich gute prinzipielle technische Lösungen, die teilweise erst in unserer heutigen Zeit umgesetzt werden konnten. Bereits im 16. Jahrhundert wurden so Zeichnungen und Prinzipskizzen nicht zuletzt zu Produkten wie dem Fallschirm, dem Helikopter oder dem Fahrrad entwickelt, deren Funktionsfähigkeit erst im Industriezeitalter nachgewiesen werden konnte. Beeindruckend sind vor allem Detaillösungen, wie der Kettenantrieb, heute eine Selbstverständlichkeit, die im modernen Fahrrad (ab dem Ende des 19. Jahrhunderts) umgesetzt wurde. Die Sammlung seiner Erfindungen stellen einen technischen Lösungskatalog für eine Vielzahl von Problemen im Umfeld der Menschheit dar. Sicherlich mag ein Großteil seiner Erfindungen durch sorgfältige Beobachtung der Natur entstanden sein, jedoch sind es vor allem Problemstellungen, die ein Bedürfnis nach einer Lösung hervorbringen und damit die Beobachtung erst initiieren. POPPER spricht von Problemen als „Ausgangspunkt der Wissenschaft“ und von der „Wahrnehmung über Sinne“ als „Werkzeug, um bestimmte [...] Probleme zu lösen“ [POPPER 2002 S. 19 FF]. Das Erkennen eines Problems und seine richtige Formulierung ist der Ausgangspunkt für eine erfolgreiche Problemlösung. Weitere grundsätzliche Aspekte werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

---

<sup>1</sup> Stellt ein Ziel als Unbekannte ein Problem dar, so ist das Wissen zu generieren, was das Ziel eigentlich sein soll. In dem genannten Beispiel eben die Frage, wohin die Wanderung gehen soll.

### 2.3.1 Natürliches Vorgehen zur Problemlösung

Wie gehen nun Menschen bei der Lösungssuche vor? Über lange Zeit haben sich Vorgehensweisen zu Heurismen<sup>1</sup> herausgebildet [VON DER WETH 1998] und sind heute als Vorgehensstrategien, wie beispielsweise das „Fallbasierte Schließen“ oder das „Hillclimbing“ [LUGER 2002 312 FF] bekannt. Die Forschung zum Themengebiet der künstlichen Intelligenz versucht seit geraumer Zeit, diese Strategien auf technische Systeme zu übertragen. Im Folgenden soll die Problemlösung anhand einer der natürlichsten – wahrscheinlich auch bekanntesten – Vorgehensweisen, nämlich dem „Trial and Error“- oder „Versuch und Irrtum“-Verhalten [THORNDYKE ET AL. 1930] näher betrachtet werden. Bei diesem Vorgehen werden so lange ohne System unterschiedliche Alternativen erprobt, bis schließlich eine Lösung gefunden ist. Ein Beispiel für ein solches Verhalten soll für das Problem beschrieben werden, aus einem Labyrinth den Weg nach draußen zu finden. Dazu wird von einem Startpunkt ausgehend ein Weg gewählt und beschritten. Endet dieser Versuch in einer Sackgasse, wird immer wieder zurückgegangen und ein anderer Weg gewählt und beschritten. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis der Weg aus dem Labyrinth gefunden ist. Aus solchen natürlichen Vorgehensweisen werden deskriptive Modelle abgeleitet, die solche handlungslogischen Einheiten auf abstrakter Ebene beschreiben. Das „Versuch und Irrtum“-Verhalten lässt sich mithilfe des TOTE-Schemas [MILLER ET AL. 1973] als basales Modell der Handlungsregulation durch die beiden elementaren Prozesse Evaluation und Handeln beschreiben. Dabei wechseln Prüf- und Handlungsschritte, bis bei einem Prüfungsschritt der Abgleich zwischen „Ist“ und „Soll“ positiv bewertet wird und der Regelkreis verlassen werden kann.

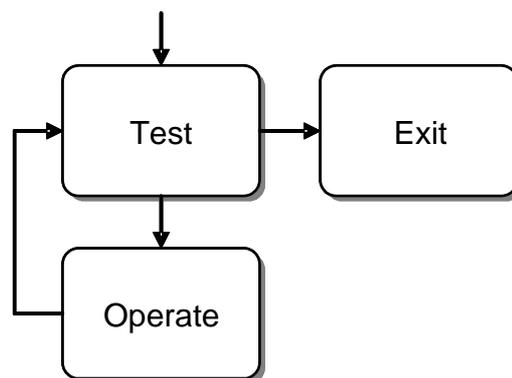


Abb. 2-1: TOTE-Schema [MILLER ET AL. 1973]

<sup>1</sup> Heurismus: Aus dem griechischen Wort *επιρίσκο*, *heurisko*. Bedeutet wörtlich *ich finde*: Verfahren, Probleme zu lösen, methodische Anleitung [DUDEEN 2005]. Heurismen werden in vielen Disziplinen (Informatik, Denk-

Für die Einordnung eines Vorgehens (etwa der Suche nach dem Weg aus einem Labyrinth) in ein Vorgehensmuster oder ein deskriptives Modell gilt eine Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der Beobachtung. Auf einer sehr konkreten Betrachtungsebene finden sich eine Vielzahl an Denk- und Handlungsschritten, die sich nicht mit „Versuch und Irrtum“-Verhalten oder dem TOTE-Schema beschreiben lassen. Etwa die Entscheidung, ob bei einer Sackgasse nur bis zum letzten Abzweig oder bis zum Startpunkt zurückgegangen und ein anderer Weg probiert wird, stellt eine dem „Versuch und Irrtum“-Verhalten übergeordnete gedankliche Leistung dar. Somit kommt bei Menschen „Versuch und Irrtum“-Verhalten auf dieser Ebene zum Problemlösen eher selten vor [DÖRNER 1987 S. 72].

Denn Menschen probieren meist zielorientiert mit einem Vorsatz. Das bedeutet, dass eine gedankliche Handlungsvorwegnahme [HACKER 1998, WULF 2002], auch internalisiertes Probehandeln [FREUD 1912 NACH DÖRNER 2001 S. 508] genannt, der eigentlichen Handlung vorausgeht. Diese Vorwegnahmen sind in gewisser Weise (Handlungs-)Ziele und gelten als Antizipation künftiger Effekte. Ausgehend von einem solchen Ziel führt der Handelnde Transformationen (Veränderungen) zum Zweck der Zielerreichung durch, auf die jedes Handeln in einem Ist-Soll-Vergleich überprüft wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass es über die Summe vieler Handlungen einen Lerneffekt gibt [POPPER 2002 S. 17, RUTZ 1985 S. 159, THORNDYKE 1930], welcher es auf der Basis von Erfolg und Misserfolg aus vergangenen Problemlösehandlungen ermöglicht in ähnlichen Situationen Lösungshandlungen mit hoher Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs auszuwählen. In einer neuen Situation wird (mitunter auch unbewusst) eine Recherche nach ähnlichen Situationen und erfolgreichen Lösungen durchgeführt, das Gedächtnis gewissermaßen gescannt. Schließlich sorgt eben diese Erfahrung dafür, dass die Summe bekannter Situationen und Lösungen mit der Zeit größer wird. Erfahrungsbildung bietet noch einen weiteren Vorteil, welcher zu einem effektiven und höchst effizienten Vorgehen führen kann. Erlernte Heuristiken lassen sich weiter entwickeln und können so als Strategien in Problemsituationen angewandt werden [VON DER WETH 1998]. Beispielsweise können unbekannte Problemstellungen bewusst soweit geändert, angepasst und aufgebrochen werden, bis sie abstrahiert oder in Teilprobleme aufgespaltet bekannten Situationen ähnlich sind [RUTZ 1985 S. 47 NACH DUNKER 1963]. Durch Extrapolation bekannter erfolgreicher Lösungswege lassen sich auch neuartige Problemstellungen erfolgreich bearbeiten [DÖRNER 1987 S. 79]. Erfahrung kann sowohl in Form von Sachwissen als auch Prozesswissen [EHRENSPIEL 2003 S. 119] vorliegen. Man darf jedoch nicht übersehen, dass durch spontane Lösungsgenerierung über Erfahrung die Chance eingeschränkt wird, eine atypische aber bessere Lösung für eine spezifische Situation zu finden. Auch werden durchaus entscheidende Parameter unreflektiert vorausgesetzt und so

---

psychologie etc.) meist unterschiedlich definiert. Hier ist ein Heurismus als eine „Vorschrift für eine Aneinanderreihung mentaler Operationen“ zu betrachten [DÖRNER 1987 S. 39].

ein unter Umständen ungeeignetes Vorgehen zur Problemlösung gewählt, obwohl bei der vorliegenden Sachlage jedoch ein anderes Vorgehen sinnvoll wäre.

### 2.3.2 Denken und Handeln zur Lösung von Problemen

Das Lösen von Problemen als zentrales Element eines Produktentwicklungsprozesses ist vor allem durch Denken geprägt [BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 S. 15]. Problemlösendes Denken erfolgt nach Funke, um „Lücken in einem Handlungsplan zu füllen, der nicht routinemäßig eingesetzt werden kann. Dazu wird eine gedankliche Repräsentation erstellt, die den Weg vom Ausgangs- zum Zielzustand überbrückt" [Funke 2003 S. 25]. Schon Freud erkannte Denken als „inneres oder experimentelles Probehandeln“ [IN FUNKE 2003 S. 59]. Beim dialektischen Denken findet ein innerer Dialog statt [GRAMANN 2004 S. 41], der sich durch einen Wechsel von Synthese- und Analyseschritten charakterisiert. Auch wenn Teile dieses Denkens unbewusst angestoßen werden können (spontane Einfälle etc.), so ist der gesamte Vorgang durchaus im Rationalbetrieb zu sehen. Es lässt sich beim Problemlösen mitunter auch eine logisch-analytische Denkform erkennen. Die Problemlösung über Logik und rationales Handeln bedeutet, dass das Ergebnis und der Ursprung des Wissens bewusst sind. Dieses Vorgehen ist bei bestimmten Problemen effektiv aber nicht für jedes Problem möglich oder geeignet. MÉRÖ [2000 S. 270 FF] beschreibt dazu Beispiele, in denen Probleme durch dieses Vorgehen nicht lösbar sind, so grenzt die Logik die Problemlösung schon dadurch ein, dass sie nicht-logisches Vorgehen fälschlicherweise als irrational definiert. Auch bei der Problemlösung in Produktentwicklungsprozessen ist das rein logisch-analytische Denken in bestimmten Fällen als nicht optimal anzusehen. Beide Denkformen treten jedoch meist gemischt auf [RUTZ 1985 S. 70] und ergänzen sich bei der Lösungssuche.

Neben der Betrachtung der Denkformen ist die Sicht auf die kognitiven Ebenen [RASMUSSEN 1986 S. 101] zum Verständnis des Prozesses des Problemlösens wichtig.

KNOWLEDGE-BASED DOMAIN	Planning in terms of functional reasoning by means of symbolic model:  "As Can Be" <b>Achronic</b>	OFF-LINE EVALUATION AND PLANNING	
RULE-BASED DOMAIN		Planning in terms of recall of past and rehearsal of future, predicted scenarios:  "As Has Been and May Be" <b>Diachronic</b>	Attention on cue classification and choice of action alternatives  <b>Synchronic</b> "As Is"
SKILL-BASED DOMAIN		Synchronous "As Is"	
Data driven chaining of sub-routines with interrupt to conscious, rule-based choice in case of ambiguity or deviation from current state of the internal world model		ON-LINE, REAL TIME OPERATION	

Abb. 2-1: 3-Ebenen Modell der Handlungsregulation [Rasmussen 1986 S. 101]

Aufgaben- und Problemstellungen können auf drei so genannten Ausführungsebenen bearbeitet werden. Auf der fähigkeitsbasierten Ebene werden Aufgaben in Form von Routinen abgearbeitet. Hier wird unbewusst die vorliegende Situation mit gespeicherten Mustern verglichen und bei Übereinstimmung über vorprogrammierte Anweisungen bearbeitet. In dieser Ebene wird reizgesteuert ein Verhaltensprogramm nach dem anderen abgearbeitet [DÖRNER 1998 S.509]. Ist kein Muster basal gespeichert, so muss in eine regelbasierte Ebene gewechselt werden, in der zwar ebenfalls über die Anwendung von gespeicherten Regeln (Methoden) „vertraute“ Probleme bearbeitet werden können, jedoch muss hier aktiv der Abgleich zwischen der vorliegenden Situation und einem Muster stattfinden. Führt die Anwendung gespeicherter Regeln beispielsweise aufgrund völlig unbekannter Situationen nicht zum Erfolg, so muss die Problembearbeitung auf einer wissensbasierten Ebene stattfinden. Auf dieser höchsten kognitiven Ebene muss das Problem bei der Analyse über einen hohen geistigen Aufwand bearbeitet und ein entsprechendes Verhaltensprogramm zur Lösungsgenerierung adaptiert (falls ähnlich vorhanden) oder gänzlich neu entwickelt werden. DÖRNER [1998 S. 588] spricht hier von einer Leiter, auf der ein Problemlöser beim Handeln ständig auf- und absteigt. Je vertrauter also eine Situation erscheint, desto eher wird diese auf einer der unteren Ebenen bearbeitet, denn hier scheint die Effizienz („geringerer Zeitaufwand“) ebenfalls höher. Damit bewegen sich erfahrene Problemlöser überwiegend und bevorzugt auf

der Fähigkeitsbasierten Ebene, können aber gleichzeitig auf der Wissensbasierten Ebene noch erfolgreich agieren, während Novizen für eine erfolgreiche Problemlösung vor allem Handlungen auf der Regel- und Wissensbasierten Ebene ausführen müssen. Grundsätzlich bevorzugen beide jedoch die Mustererkennung auf der regelbasierten Ebene zur Problemlösung.

### 2.3.3 Menschliche Voraussetzungen zur Problemlösung

Aufgrund der Tatsache, dass Problemlöseprozesse vor allem auf dem Denken basieren, werden an den Problemlöser besondere Ansprüche gestellt [BOURNE, ET AL. 1971 S. 98 FF]. Um die Leistung einer Problemlösung erbringen zu können, ist in erster Linie eine Motivation nötig [FRICKE 1993 S. 18, FUNKE 2003 S. 37], die Probleme überhaupt anzugehen. Des Weiteren benötigt der Problembearbeiter besondere Fähigkeiten und Fertigkeiten zur Problemlösung. Zum einen ist die heuristische und methodische Kompetenz, also Problemlösefähigkeit und -wissen [EHRENSPIEL 2003 S. 51, Fricke 1993 S. 18] zu nennen, welche zur Planung und Steuerung des eigenen Vorgehens sowie zur Anwendung von Methoden unabdingbar sind. Das entsprechende Wissen wird Handlungswissen beziehungsweise prozedurales Wissen genannt [LINDEMANN 2005 S. 19]. Zum anderen ist zur Problemlösung vor allem das Faktenwissen, auch deklaratives Wissen genannt, gefordert. Prozedurales und deklaratives Wissen müssen dabei nicht unbedingt intern im Gedächtnis gespeichert sein, sondern können auch von außen den problemlösenden Denkvorgängen zugeführt werden. Obwohl bislang „unklar ist [...] welches heuristische Wissen ein guter Konstrukteur hat, wie er im Laufe des Konstruktionsprozesses Wissensbestände gebraucht, ephemere Gedächtnisstrukturen bildet und verwendet“ [DÖRNER 1994 S. 160], lässt sich die Bedeutung von Wissen im Kontext der Problemlösung nicht in Frage stellen.

Bilanzierend lässt sich für dieses Kapitel feststellen, dass Probleme über bewusstes Denken gelöst werden. Dieses ist geprägt von Handlungen zur Informationsaufnahme und -umsetzung sowie Wissensaufbau. Zum Problemlösen werden bestimmte Denkvorgänge ausgeführt, die zu einer Lösung führen sollen. Dabei werden aus Erfahrung selbst gebildete Strategien und externes heuristisches Wissen angewendet. Diese Denkweisen können in Modellen abgebildet werden, um die Vorgänge über das Aufzeigen häufig auftretender Denkkustände und -operationen erklären zu können. Menschen wenden nicht nur unterschiedliche Strategien an, auch ihre individuellen kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten sind unterschiedlich stark ausgeprägt. Zur Schwierigkeit des Problemlösens zählt zusätzlich, dass es für Probleme trotz einer einheitlichen Definition keinen idealen Lösungsweg gibt [DÖRNER 1998 S. 159]. Ein Weg, der in einer Situation hilfreich ist, kann in einer anderen Situation für ein ähnliches Problem nicht sinnvoll sein.

## 2.4 Fehler als menschliches Schicksal

Entwicklungsprozesse werden durch technische Problemstellungen und deren Bearbeitung gekennzeichnet. Idealerweise wird durch entsprechendes Denken und Handeln eine optimale (das heißt für eine Problemstellung bestmögliche) Lösung gefunden. Da dies meist nicht festzustellen ist, stellt eine Lösung, die überhaupt das Problem löst, den Entwickler bereits zufrieden. Es besteht auch die Möglichkeit, dass keine Lösung für ein Problem ausgemacht werden kann, sodass die problemverursachende Barriere bestehen bleibt. In diesem Fall muss ein anderer Weg gefunden werden, bei dem diese Barriere nicht auftritt, indem beispielsweise Ziele neu definiert werden.

### 2.4.1 Fehler und Katastrophen

Fehler beim Entwickeln und Konstruieren sind als kritisch zu sehen, da sie zu schädlichen Auswirkungen im Produkt und Prozess führen und mitunter weitreichende Folgen haben können. Auf der Basis von unsicheren Annahmen müssen Entwickler im Tagesgeschäft ständig Entscheidungen treffen, deren Folgen jedoch nicht unmittelbar erkennbar sind. Über die „Festlegung und die Entstehung von Produktkosten“ [EHRENSPIEL ET AL. 1998 S. 12] lassen sich Komplikationen dieser Tatsache verdeutlichen: So sind Entwickler durch frühe Entscheidungen für etwa 70 Prozent der entstehenden Kosten eines Produktes verantwortlich, die erst in nachfolgenden Prozessen entstehen (ca. 65 Prozent). Die Entscheidung etwa, ob zwei Bauteile miteinander durch Löten, Schweißen oder mittels Nieten verbunden werden, kann aus unterschiedlichen Gründen zu extrem unterschiedlichen Produktkosten führen. Wird der Fertigungsprozess im eigenen Unternehmen beherrscht, sind bestimmte Maschinen auszulasten oder muss die Arbeitsleistung extern erfolgen -dies sind nur wenige von vielen Faktoren, die aus Sicht der Produktion bezüglich der Fertigung zu beachten sind. Schließlich sind für eine Festlegung einer Verbindungsart noch Produkthanforderungen wie Festigkeit, Korrosionsverhalten oder Dichtigkeit zu beachten. Hierbei ist anzumerken, dass viele Entscheidungen bezüglich einer Anforderung viele weitere Anforderungen bedingend festlegen. Eine Festigkeitsforderung kann ein Fertigungsverfahren genauso festlegen, wie eine unternehmensinterne Richtlinie, z.B. Schweißprozesse zu bevorzugen. Viele Festlegungen und Entscheidungen in der Produktentwicklung müssen in komplexen Situationen getroffen werden und bergen dadurch ein erhöhtes Potenzial für Fehler. Fehler können zu erhöhten Kosten führen, zu suboptimalen Lösungen und damit auch zu suboptimalen Produkten bis hin zu Katastrophen, wenn in der Anwendung von Produkten Konstruktionsfehler, mit oder ohne Einwirken bestimmter äußerer Umstände, für ein Versagen eines Systems sorgen. Am 3. Juni 1998 entgleist der ICE „Wilhelm Conrad Röntgen“ mit etwa 200 km/h an einer Weiche. Zwei Kilometer vor Eschede in Niedersachsen reißt er hinter dem Triebkopf ab und stößt gegen die Pfeiler einer Brücke,

die daraufhin auf eine Wagenhälfte einstürzt. Die folgenden Wagen schieben sich daraufhin im Zickzack zusammen und sorgen so für das größte Zugunglück in der Geschichte der Deutschen Bahn. Die Ursache der Entgleisung war ein gebrochener Radreifen an einem Rad an der dritten Achse des ersten Wagens. Um das Problem der Komfortreduzierung durch Resonanzen zu vermeiden waren Jahre vorher anstelle von Vollstahlrädern gummigefederte Einringräder verbaut worden. Bei diesen, auch im langsameren Personennahverkehr eingesetzten Radsystemen, ist die dynamische Belastung auf das Rad während des Betriebs höher als bei den konventionellen Monoblock-Rädern. Bei der Konstruktion der Räder wurde bei der Festlegung der zulässigen Abnutzung die höhere dynamische Belastung nicht mit einem für Hochgeschwindigkeitszüge entsprechenden Sicherheitsaufschlag berechnet, sodass der zulässige Raddurchmesser anstatt auf 890 mm auf nur 854 mm festgelegt wurde. Das entsprechende Rad hatte zum Zeitpunkt des Schadenseintritts einen Durchmesser von 862 mm [WIKIPEDIA 2005B 16.3.05].

Das Versagen eines Systems lässt sich zwar im Nachhinein meist durch menschliches Verhalten erklären, bis heute jedoch nicht ausnahmslos bereits im Vorfeld verhindern [BADKESCHAUB 2005]. Wie in diesem Beispiel ersichtlich, können Unfälle nicht nur durch „menschliches Versagen“ bei der Interaktion eines Mensch-Maschine-Systems (MMS) [BUBB 1992 S. 16 ff], zum Beispiel durch Missbrauch eines technischen Produkts, entstehen. Die Grundlage für ein Systemversagen kann schon sehr früh im Produkterstellungsprozess passieren, nämlich bei der Entwicklung dieser Systeme. Die Vermeidung von Denk- und Handlungsfehlern in dieser Phase des Produktlebenslaufs ist daher essenziell für nicht versagende Produkte. Die Betrachtung dieser Fehler kann einen Eindruck über die Schwierigkeit einer erfolgreichen Produktentwicklung geben.

#### **2.4.2 Fehler im Kontext des Handelns beim Problemlösen**

Reason stellte zur Definition von Fehlern ein Modell auf, welcher die Einflussparameter Absicht, Handlung und Folgen in eine Beziehung bringt [REASON 1992 S. 6].

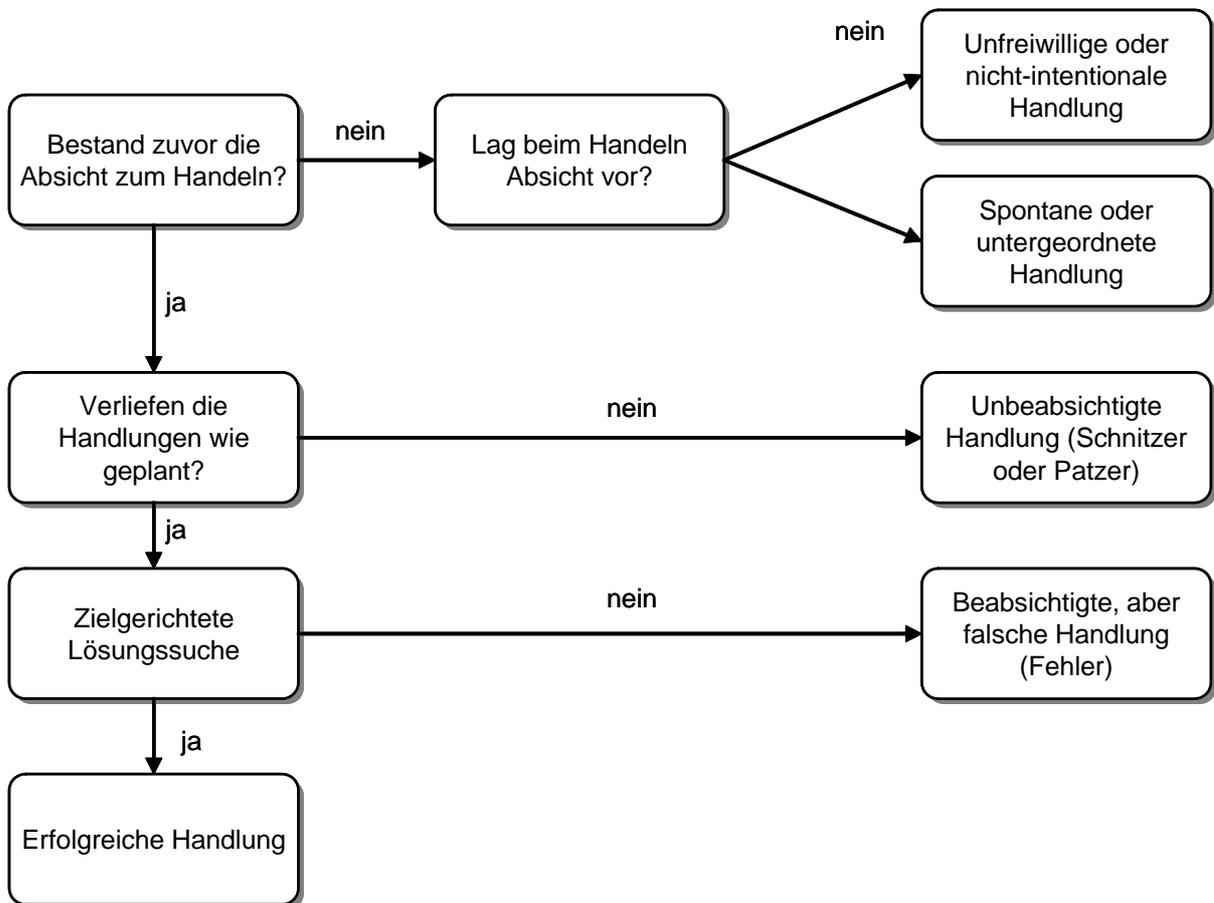


Abb. 2-2: Fehlerklassifikation [REASON 1992 S.6.]

In dieser Klassifikation sind intentionale und nicht intentionale Handlungen von dem Begriff des Fehlers zu unterscheiden. Nicht intentionale Handlungen sind Handlungen ohne Absicht vor wie während einer Handlung. Dieser Fall eines Automatismus tritt etwa bei unbeabsichtigten Reflexen ein. Intentionale Handlungen ohne vorher bestehende Absicht, jedoch mit Absicht bei der Handlungsausführung, werden spontan- oder untergeordnete Handlung genannt.

Fehlverhalten bedingt eine vorherige Absicht und lässt sich in die Bereiche Patzer (und Schnitzer) sowie Fehler einordnen. Patzer (und Schnitzer) sind Fehlleistungen bei der Ausführung<sup>1</sup>, bei denen eine geplante Handlung fehlerhaft ausgeführt wird, beispielsweise der Ver-

<sup>1</sup> Um eine Konsistenz in der Nomenklatur „Fehler“ zu gewährleisten, wird hier auf die Formulierung Ausführungsfehler bewusst verzichtet. Die im umgangssprachlichen Gebrauch leider übliche, sehr allgemeine und übergreifende Verwendung des Begriffs Fehler in Bezug auf divergente Denk- und Handlungsabläufe bei Menschen ist nicht zuletzt in der gleichartigen Übersetzung der englischen Wörter „Error“ (eig. Fehlverhalten als Überbegriff für Schnitzer, Patzer und Fehler) und „Mistake“ (eig. Fehler) begründet.

such mit dem Autoschlüssel die eigene Haustüre aufsperrern zu wollen oder am Telefon die falsche Nummer zu wählen. Diese Art des Fehlverhaltens ist vor allem auf automatisiert ablaufende Handlungen begrenzt. Weitaus kritischer, da auch die Wahrscheinlichkeit des Entdeckens weitaus geringer ist, ist jedoch das Fehlverhalten in der gedanklichen Planung einer Handlung zu sehen. Durch diese Fehler (auch Planungsfehler) führen beabsichtigte Handlungen nicht zu den gewünschten Folgen. Reason definiert Fehler „als Mängel oder Misserfolge bei den Beurteilungs- und Schlussfolgerungsprozessen [...], die bei der Auswahl eines Ziels oder bei der Spezifikation der Mittel, um dieses Ziel zu erreichen, eine Rolle spielen, unabhängig davon, ob die von diesem Entscheidungsprogramm geleiteten Handlungen planmäßig ablaufen“ [REASON 1992 S. 9]. (Planungs-)Fehler können aus Denkfehlern im Sinne eines Fehldeutens oder -schließens entstehen. Eine weitere Ursache sind Fehlhandlungen, begründet im Fehlplanen oder -entscheiden.

- Fehldeuten: Ein aufgetretener Effekt bzw. eine sich darstellende Situation wird falsch erkannt. Z. B. die Anforderung „in höchst korrosiver Umgebung einsetzbar“ wird nicht weiter beachtet, da ein Edelstahl V2A (Werkstoffnummer: 1.4301 nach DIN 17440) verwendet wird und dieser als „rostfrei“ angesehen wird. In der gegebenen Situation wäre jedoch ein V4A-Stahl (Werkstoffnummer: 1.4571 nach DIN 17440) zu wählen, da unter der formulierten Anforderung eine Seewasserbeständigkeit gefordert ist.
- Fehlschließen: Zu einem aufgetretenen Effekt bzw. zu einer Situation wird die falsche Ursache zugeordnet. Z. B. wird bei einem Versuch mit einem Prototyp festgestellt, dass ein Zahnrad erhöhten Verschleiß aufweist. Anstatt die Ursache in einem falsch ausgelegten Schwingungsdämpfer zu suchen, wird davon ausgegangen, dass das Zahnrad eine zu geringe Oberflächenhärte besitzt.
- Fehlplanen: Die Deutung und Schlussfolgerung einer Situation ist richtig, der abgeleitete (Handlungs-)Plan jedoch nicht. In einer Krisensituation aufgrund des Ausfalls eines Produktes beim Kunden, wird die neue Information in die Verbesserung neu auszuliefernder Produkte implementiert, es wird jedoch versäumt, die aktuelle Situation des Kunden in die Planung zu integrieren und eine Sofortmaßnahme zu beschließen, die das Risiko reduziert, den Kunden zu verlieren.
- Fehlentscheiden: Der Fehler liegt in einer falschen Entscheidung. Bei der Auswahl eines zweier möglicher Konzepte wird die kostengünstigere und qualitativ minderwertige Alternative entschieden. Der Markterfolg bleibt aus, da die Verbraucher höherwertige Produkte kaufen und bereit sind, dafür mehr zu zahlen.

Der Vollständigkeit halber, im Weiteren aber nicht näher betrachten, lassen sich hier auch so genannte Verstöße einordnen, die für „absichtliche aber nicht notwendigerweise verwerfliche Abweichungen von Verhaltensvorgaben“ stehen. Ein Verstoß widerspricht auch nicht dem Ziel der diese Handlung ausführenden Person und ist somit streng genommen auch nicht als

Fehlhandlung zu definieren [REASON 1992 S. 195]. Häufig wird auch der Begriff Irrtum im Zusammenhang mit Fehlern verwendet [SEMMER ET AL. 1996 S.11 FF]. Dieser lässt sich den Fehlern zuordnen und bezeichnet bewusst gesteuerte, absichtliche Handlungen in der gedanklichen Annahme der Richtigkeit dieser Handlung. Das Ergebnis dieser Handlung kommt überraschend und ist eindeutig nicht beabsichtigt.

Betrachtet man diese Einteilung der Fehler im 3-Ebenen-Modell nach Rasmussen [RASMUSSEN ET AL. 1974, RASMUSSEN 1986 S. 101 ODER STRÄTER 1996 S. 23] so lassen sich die beiden Typen des Fehlverhaltens in dieses Schema ohne weiteres einordnen. Während Patzer als Fehlleistungen automatisierter Handlungen eindeutig der Fähigkeitsbasierten Ebene zuzuordnen sind, finden Fehler im Denken und Handeln ausnahmslos auf der Regel- und Wissensbasierten Ebene statt. Hierzu hat REASON ein Generisches, das heißt Allgemeines Fehlermodellierungs-System (GFMS) erstellt, in dem ein integriertes Bild der Fehlermechanismen dargestellt ist [REASON 1992 S. 61 FF].

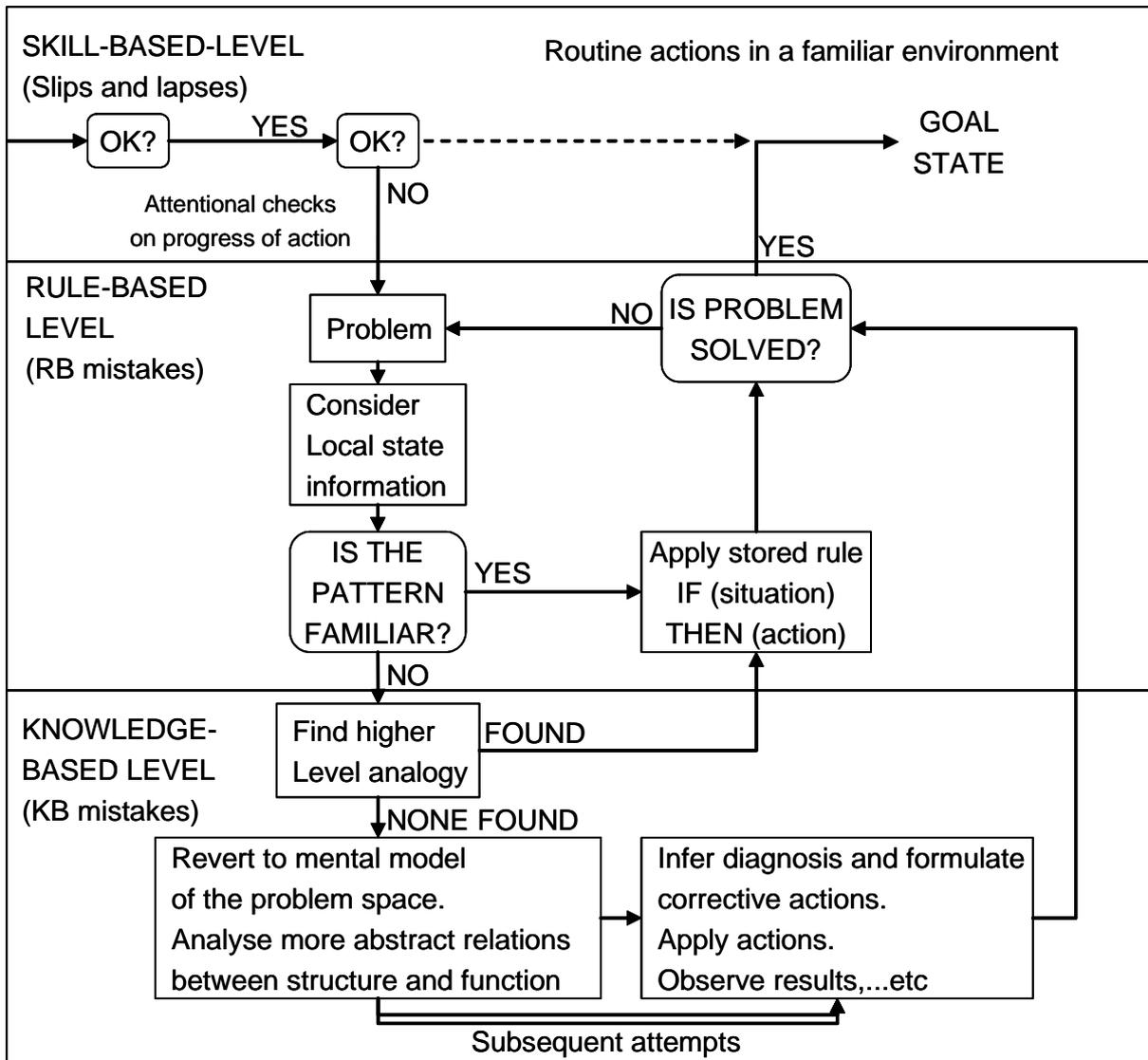


Abb. 2-3: Generisches Fehler-Modellierungs-System [Reason 1992 S. 64]

Um aus der Fähigkeitsbasierten in die Regelbasierte Ebene zu wechseln, ist ein Kontrollmechanismus nötig. Schließlich ist hier der Wechsel aus einer automatisierten in eine bewusste Handlungsausführung zu vollziehen. Auch der Wechsel von der Regelbasierten in die Wissensbasierte Ebene ist bewusst durchzuführen, indem erkannt werden muss, dass keine Regel bzw. Methode vorhanden ist, die auf die vorhandene Situation passt. Auf der höchsten Ebene kann eine Methode für das Problem entsprechend adaptiert oder ein Problem hinsichtlich einer vorhandenen Methode nochmals überdacht werden. Zur Problembearbeitung ist nicht nur ein einmaliges Wechseln üblich. Iterationen aus Handlungs- sowie Prüfschritten lassen sich auf allen Ebenen beobachten, bis eine (scheinbar) passende Lösung vorliegt. Damit sind nicht

nur auf den Ebenen selbst sondern auch bei einem Wechsel von Ebene zu Ebene Ausführungen notwendig, die ein Fehlverhalten implizieren können.

Besondere Beachtung verdienen Fehler als Fehlhandlungen auf der Regel- und Wissensbasierten Ebene aufgrund ihrer möglichen folgenreichen und spät erkennbaren Wirkung auf Problemlöseprozesse. Für Fehler auf der Regelbasierten Ebene zu unterscheiden, ob passende Regeln falsch oder falsche Regeln angewendet werden. Auf der Wissensbasierten Ebene werden vor allem über falsche parameterbasierte Annahmen nur scheinbar richtige Vorgehensweisen festgelegt. Dieses Modell ist wichtig, um Fehlerarten und ihr Auftreten verstehen zu können.

### **2.4.3 Natürliche Verhaltensweisen als Ursache für Handlungs- und Denkfehler**

In den vorigen Kapiteln wurde der Begriff Fehler im Verhalten von Menschen bei der Problemlösung vorgestellt, im Zusammenhang des Handelns zur Problemlösung spezifiziert und von Fehlleistungen bei der Ausführung, den so genannten Patzern und Schnitzern abgegrenzt. Zur Beschreibung individueller menschlicher Fehlerursachen typischer Handlungen im Entwicklungsprozess sind weitere Einschränkungen sinnvoll. So sollen hier vor allem die Voraussetzungen des Systems Mensch in seiner psychischen Leistungsfähigkeit als Individuum und Problemlöser betrachtet werden. In diesem Zusammenhang weniger relevant sind weitere Ursachen aus seinem Umfeld, wie Organisationsstrukturen des Unternehmens oder Interaktionsprozessen zwischen Menschen in Gruppen. Jedoch ist zu beachten, dass die Situation, wie Stress und Zeitdruck eine negative menschliche Verhaltensweise noch verstärken kann. So zeigt sich etwa bei der „Intellektuellen Notfallreaktion“ [DÖRNER 1987 S. 101], dass sich das Denken zu reflexhaften Verhalten [S. 107] und auf verkürzte Hypothesen mit globalem Charakter reduziert. Im Weiteren soll auch nicht die Leistungsbereitschaft in Frage gestellt werden, da hier davon ausgegangen werden soll, dass ein Problemlöser in seiner Tätigkeit der Produktentwicklung motiviert ist, anstehende Probleme zu lösen.

Fehler auf der Regel- und Wissensbasierten Ebene können, wie angesprochen, Denkfehler durch falsches Deuten einer sich bietenden Situation oder Problemstellung sein bzw. durch falsches Schließen auf einen bestimmten Fall aufgrund ähnlicher Faktoren sein. Zum anderen kann es sich um Handlungsfehler handeln, die in einem falschen Plan oder einer falschen Entscheidung begründet sind. Bei der Betrachtung der Ursachen für diese Fehler lassen sich kognitive und motivationale Ursachen unterscheiden. Diese stellen gewissermaßen die Basis für ein Verhalten dar, das schließlich zu Fehlern führen kann. Kognitive Ursachen sind das unvollständige Wissen bei einer Problembearbeitung sowie eine grundsätzlich beschränkte Rationalität des Menschen [SCHAUB 1996 S. 13]. Diese Nachteile versuchen Menschen durch bestimmte Verhaltensweisen, dem Abgleich und der Anwendung mit gespeicherten Mustern

zu begegnen und so für eine Optimierung im Handeln zu sorgen. Dies kann zwar eine effiziente Problembearbeitung ermöglichen, dadurch aber wiederum zu Fehlern führen. Da Menschen versuchen, scheinbar unnötigen Aufwand zu vermeiden, entstehen Fehler vorwiegend über zwei primäre Mustererkennungsprozesse, dem Similarity Matching und dem Frequency Gambling [REASON 1992 S. 97]. Similarity Matching bedeutet nichts anderes, als dass neue Situationen und Problemstellungen aufgrund von Ähnlichkeit in bestimmten Merkmalen mit bekannten Lösungen und Vorgehensweisen bearbeitet werden. Hier kommt bezüglich der Fehlerauslösung zum Tragen, dass zum Ähnlichkeitsabgleich nicht immer alle notwendigen Einflüsse beachtet werden. Beim Frequency Gambling wird die Wahl einer Vorgehensweise oder Lösung aufgrund der Häufigkeit bisheriger Anwendungen ausgelöst. Hat man ein Auto, das aufgrund einer schlechten Batterie manchmal nicht anspringt, so denkt man bei jedem missglückten Startversuch erst mal an die Batterie als Ursache, auch wenn der Anlasser defekt wäre. Auch hier werden teilweise wichtige Einflüsse ausgeblendet, um ein Problem in ein Muster einordnen zu können.

Betrachtet man die hinter solchen Mustererkennungsprozessen stehenden Verhaltensweisen, so lassen sich hierfür in der Literatur eine große Anzahl unterschiedlicher Begriffe finden, deren gegenseitige Abgrenzung nicht ausnahmslos leicht fällt [DETJE 1996, DÖRNER 2004, STROHSCHNEIDER ET AL. 1987]. Hinsichtlich der Entstehung von Fehlern sind bestimmte Verhaltensweisen bezüglich einer falschen Informationsselektion besonders ausschlaggebend: Zentralreduktion, Nichtbeachtung der Ablaufgestalt und Dynamik von Prozessen, Übergeneralisierung, Strukturextrapolation oder die Dekonditionalisierung von Bedingungen sind als Ursachen für eine ungenügende Modellbildung aufzuführen, welche statt zu einer Effizienzsteigerung des menschlichen Handelns zu Fehlern führen kann.

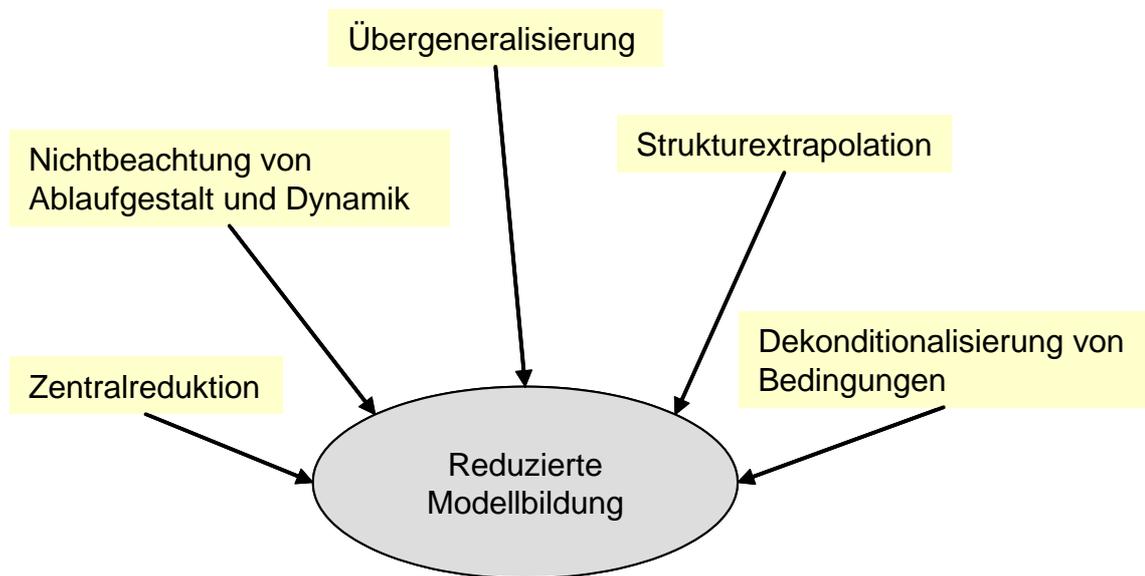


Abb. 2-4: Zuordnung von Fehlerursachen

Als motivationale Ursachen ist neben der Überbewertung des aktuellen Problems vor allem der Schutz des eigenen Kompetenzzempfindens zu nennen, der als typisches Verhalten eine besondere Ursache für Fehler darstellt [SCHAUB 1996 S. 14FF., BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 S. 154FF.]. Motivation und Emotion haben auf das Verhalten einen starken und nachhaltigen Einfluss. Verschiedene Bedürfnisse führen zu Motiven, deren Wunsch nach Zielerreichung bestimmte Verhaltensweisen implizieren und verstärken. Auch die bei den handelnden Personen vorherrschenden Gefühle, wie etwa eine mangelnder Kompetenz zur Bewältigung einer Situation, verstärken oder schwächen bestimmte Verhaltenstendenzen, wie die Tendenz zur Erforschung von Ursachen oder die Suche nach Unbestimmtheiten. Zwei wesentliche Parameter, die in diesem Zusammenhang zu nennen sind, sind der Auflösungsgrad und die Selektionsschwelle. Nimmt der Auflösungsgrad, das bedeutet die Genauigkeit der kognitiven Prozesse, aufgrund der beschriebenen Einflüsse ab, so führt das schließlich zu erhöhtem Risiko im Denken und Handeln. Ebenso verhält es sich mit der Selektionsschwelle, bei deren Überschreitung ein neues Motiv zu einem Absichts- und damit zu einem Handlungswechsel führt [DÖRNER 1998 S. 175 FF].

#### 2.4.4 Negative Auswirkungen von Fehlern

Fehler sind schon aufgrund der menschlichen Ressourcen nicht immer vermeidbar. Dennoch sollte man mit angemessenem Aufwand versuchen, das Auftreten solcher zu verhindern, denn Fehler bleiben in den seltensten Fällen ohne Folgen. Im günstigsten Fall ist ein Fehler im

Gründe folgenlos, weil der Fehler keine gravierenden Auswirkungen hat. z. B. ein Entwickler wendet eine unangemessene Methode an und kommt dennoch durch Zufall auf das richtige Ergebnis. Wird ein Fehler erkannt, so sind die Folgen abzuschätzen und zu entscheiden, ob eine Handlung implementiert werden muss oder nicht. Wird diese Frage mit einem Ja beantwortet, so führt das in der Regel zu Iterationen im Prozess. Diese Iterationen werden auch als „vermeidbare Iterationen“ [HUTTERER 2005 S. 69] bezeichnet, da richtiges Denken und Handeln unter Umständen den Fehler und damit die Iteration vermeiden hätte können. Je nachdem, an welcher Stelle der Fehler gemacht wurde, müssen Ziele neu geplant, Lösungsalternativen gesucht oder Entscheidungen revidiert und neu getroffen werden. Diese zusätzlichen Handlungen erfordern Zeit und verursachen damit Kosten. Als besonders kritisch sind Fehler in der Produktentwicklung zu sehen, wenn das Produkt bereits nachfolgende Phasen des Lebenslaufs durchläuft, denn hier entstehen die Kosten, welche in der Phase der Entwicklung durch Produkteigenschaften festgelegt wurden. Die Kosten für ein einziges Tiefziehwerkzeug, um aus einem gewalzten Blech einen Volumenkörper zu formen belaufen sich zwischen 10.000 und 50.000 Euro. Fehler bei der Entwicklung eines Produktes, die als Produktfehler in der Nutzungsphase auftreten und erkannt werden, können Kundenunzufriedenheit und besonders hohe Kosten verursachen, z. B., wenn Reparaturen auszuführen sind, um den Fehler abzustellen. Jährlich werden so nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland sondern weltweit unzählige Rückrufaktionen durchgeführt, die enorme Kosten verursachen. Der dabei auftretende Imageschaden einer Marke oder eines Unternehmens ist sicherlich noch teurer. Manchmal sind Fehler materiell nicht zu beziffern, wenn Fehler in einem Produkt zu Schäden an Mensch und Umwelt führen. Dies alles wäre vermeidbar, wenn es möglich wäre, die Fehler, die während der Produktdefinition gemacht werden, abzustellen.

#### **2.4.5 Positive Auswirkungen von Fehlern**

Betrachtet man die Natur, insbesondere die Evolution, so erkennt man, dass Fehler Teil der Optimierung natürlicher Systeme sind. Mutationen sind eine probate Möglichkeit um Systeme, in Verbindung mit einer nachfolgenden Selektion, an sich ständig ändernde Umweltbedingungen anzupassen. Auch das Denken und Handeln beim Menschen funktioniert über ausprobieren, über agieren, interpretieren und reflektieren. Aus Fehlern kann man lernen, kann seine Erfahrung erweitern. Kleinkinder probieren quadratische, kugelförmige und dreieckige Körper in entsprechende Formen zu setzen und scheitern anfangs oft genug. Als Erwachsener wird man diese Aufgabe ohne große geistige Anstrengung ausführen können. Warum soll dieser Prozess im Alltag nicht auch funktionieren? Je mehr Muster gespeichert sind, umso eher findet sich für ein neuartiges Problem eine richtige Vorgehensweise zur Lösungsfindung oder die Lösung selbst.

Neben dem Vorteil einer höheren Effizienz in späteren Problemlöseprozessen kann auch die Problemdurchdringung durch Fehler verbessert werden [POPPER 2002 S. 31]. So kann es von Vorteil sein, ohne ein Problem intensiv beschrieben zu haben, Lösungsalternativen zu suchen, um anhand deren Analyse die Anforderungen an die Problembearbeitung abzuleiten.

Fehler können auch zu ganz neuen Evolutionen/Entwicklungen führen, wenn falsch zu richtig führt [MÉRÖ 2000 S. 266]. Bei der Anwendung der Galeriemethode zeigt sich eine durchaus nützliche Situation des „Fehlermachens“. Bei dieser Methode, die sich prinzipiell kaum von der bekannten Methode Brainstorming unterscheidet, werden die Ideen nicht nur begrifflich benannt, sondern auf Papier skizziert und während oder in einer der Ideengenerierung folgenden Phase den übrigen Teilnehmern präsentiert. In dieser Situation kommt es häufig bei den Betrachtern zu Fehldeutungen durch falsche Interpretation des Gezeichneten. In einem am Lehrstuhl für Produktentwicklung regelmäßig durchgeführten Praktikum sollen 10 Studenten höheren Semesters ein mechatronisches Produkt optimieren und lernen in diesem komprimierten Produktentwicklungsprozess die praktische Anwendung zahlreicher sonst theoretisch vermittelter Methoden. Es spielt dabei eine untergeordnete Rolle, ob es sich um eine Fahrradlampe, eine Zitrusfrüchtepresse oder einen Tischstaubsauger handelt. Bei der Optimierung eines Tischstaubsaugers konnte man häufig feststellen, wie Denkfehler zu prinzipiell neuen Lösungsalternativen führen können. Im vorliegenden Fall etwa zeichnete ein Student für die Lösungssuche zu einer geforderten Funktion „Schmutz trennen“ einen Zyklon-Wirbel. Ein weiterer Student interpretierte die Zeichnung und fragte nach der genauen Wirkweise der Bürste. Damit hatte er eine weitere Alternative gefunden, von der es nur noch ein kleiner Schritt zu einer Kleberolle war. Pache [PACHE 2005 S. 84 ff] beschreibt diesen Prozess des Interpretierens und Reinterpretierens als „Prozess der Kommunikation des Entwicklers mit sich selbst anhand des Skizzierens“.

Dennoch lernen wir zu wenig aus Fehlern [Popper 2002 S. 256] als es in der bisherigen Ausführung den Anschein haben müsste. Während hierzulande eher eine „Null-Fehler-Prinzip“-Kultur herrscht, werden in anderen Kulturen Menschen angehalten, Fehler zu provozieren, um Problemlösungen zu verbessern. Es bleibt zumindest festzuhalten, dass Fehler zur richtigen Zeit, das heißt in der richtigen Situation, keinen negativen Effekt nach sich ziehen. Vor allem, wenn es sich um bewusste Vorgänge mit entsprechender Reflexion des Vorgehens handelt.

## **2.5 Entwicklungsmethodik zur Problemlösung und Fehlervermeidung**

Wie lassen sich beim Problemlösen in Produktentwicklungsprozessen Fehler vermeiden? Die Entwicklungsmethodikforschung (hervorgegangen aus der Konstruktionsmethodikforschung) gilt als relativ junge Disziplin und beschäftigt sich damit, diese Entwicklungsprozesse hin-

sichtlich Effektivität und Effizienz zu optimieren. Basierend auf den Heuristiken, abgeleitet aus erfolgreichen Problembearbeitungen, wurden und werden allgemeine Vorgehensmodelle, Methoden und Grundprinzipien generiert und Produktentwicklern an die Hand gegeben, um ein Vorgehen zur Problemlösung zu planen und durchzuführen. Vorgehensmodelle und Methoden stellen aufgrund ihrer Zielorientierung einen konkreten Problembezug dar, während Grundprinzipien als problemunabhängige taktische Maßnahmen mit strategischem Charakter zu sehen sind, die bei der Bearbeitung von Problemen in bestimmten Situationen zur Lösungsfindung beitragen können. Zur Analyse von komplexen technischen Produkten lässt sich beispielsweise das Grundprinzip „Bottom Up“ anwenden. Bei allen drei Formen dieser Hilfsmittel kommt den Ergebnissen der Forschung aus dem Bereich der Denkpsychologie inzwischen ein äußerst hoher Stellenwert zu. Ursprünglich war die Konstruktionsmethodik überzeugt, dass nur durch streng regelbasiertes und stringentes Vorgehen erfolgreiche Produktentwicklung möglich wäre. Inzwischen ist jedoch der Faktor Mensch als ein zentraler Einflussparameter erkannt worden. Dies hat dazu geführt, dass die Hilfsmittel inzwischen flexibler betrachtet werden und dem Denken des Entwicklers angepasst sind. Sie bieten ein hohes Potenzial für die Entwicklung erfolgreicher Produkte [BIRKHOFER 2004]. Im Folgenden sollen Vorgehensmodelle und Methoden als Hilfsmittel zur Problemlösung bezüglich der Vermeidung von Fehlern betrachtet werden.

### 2.5.1 Vorgehensmodelle

Vorgehensmodelle lassen sich bezüglich ihrer Verwendung in zwei prinzipiell verschiedene Arten einteilen, als deskriptive und präskriptive Modelle. Deskriptiv sollen sie ausnahmslos ein Vorgehen beschreiben, um das Denken und Handeln von Menschen nachvollziehen und explizieren zu können, im Gegensatz dazu sind sie präskriptiv verwendet als Handlungsvorgaben zu sehen, die auf einer relativ abstrakten Ebene ein Muster einer möglichen Handlung vorgeben, um Probleme zu bearbeiten.

Denkpsychologische Ansätze lassen Problemlösetätigkeiten in der Regel gut beschreiben [HACKER 2002 S. 14 ff], einige betonen dabei einen präskriptiven Charakter. In Form von Algorithmen unterstützt etwa der General Problem Solver GPS [NEWELL ET AL. 1972] als eine in ein Simulationsprogramm implementierte Theorie menschlichen Problemlösens Mittel-Ziel-Analysen hinsichtlich Transformationen für Interpolationsprobleme. Hierbei muss jedoch ein Kenntnis über anwendbare Operatoren vorhanden sein, um einen gewünschten Zielzustand auch erreichen zu können. Eine generelle Vorgehensstrategie für Konstruktionsprobleme stellt die „Allgemeine, rekursive analytisch-synthetische Konzeptamplifikation“ (ARASKAM) dar [BADKE-SCHAUB & DÖRNER 2002, DÖRNER 1998 S. 217 ff]. In diesem, explizit für die Problemlösung dialektischer Probleme anwendbaren Modell, werden auch Heuristiken, d.h. Grundprinzipien wie der Wechsel von Abstraktion und Konkretisierung, von

Bild und Begriff, von Analyse und Synthese als zentrale Determinanten des Prozesses vorgeschlagen, die als Algorithmen problem- und situationsunabhängig einzuordnen sind.

In dem Bereich der Konstruktionsmethodik wurden ebenfalls zahlreiche präskriptive Modelle entwickelt, die Entwickler bei der Problemlösung unterstützen sollen. Der Vorgehensplan nach VDI 2221 [VDI-RICHTLINIE 2221 1997, PAHL ET AL. 2004 S. 28] beschreibt für die vier Hauptphasen wesentliche Schritte beim Entwickeln und Konstruieren.

Eine andere Sichtweise formulieren allgemeine Problemlösemodelle mit der Intention, einzelne Handlungsschritte in einen zielgerichteten, geordneten Ablauf zu integrieren. Grundsätzlich lassen sich die meisten dieser Modelle auf drei Problemlösephasen Problem klären, Lösungen generieren und Lösung festlegen reduzieren. Diese werden von verschiedenen Autoren aufgegriffen und für einen jeweiligen Kontext fokussiert. Es finden sich dabei grundsätzliche Strategien integriert, wie etwa das Vorgehen vom Abstrakten zum Konkreten oder die Problemzerlegung. Stellvertretend für eine Vielzahl ähnlicher Modelle können der Problemlösezyklus als Mikrozyklus [DAENZER 2002], das F-B-S-Modell [GERO 1998 S. 47 FF] in einer Modifikation der allgemeinen Vorgehensschritte Analyse, Synthese und Evaluation nach ASIMOV [ASIMOV 1962] oder der Vorgehenszyklus nach EHRENSPIEL [2003 S. 81] genannt werden. Sie lassen meist iterative Schleifen z. B. beim mehrmaligen Wechsel von Analyse- und Syntheseschritten zu und erlauben Rekursionen, d. h. Teilschritte eines Vorgehensmodells wiederum durch ein eigenes Modell bearbeiten, sodass verschiedene Abstraktions- und Detaillierungsebenen betrachtet werden können.

Ziel aller präskriptiv verwendeten Vorgehensmodelle ist es, einen Weg aufzuzeigen, um ein gewünschtes Ziel zu erreichen. Vorgehensmodelle bezeichnen eher schlagwortorientiert und als abstrakt formulierte Teilziele auszuführende Operatoren für Synthesebarrieren. Neben dieser unkonkreten, dadurch teilweise nicht hilfreichen Formulierung wird vor allem der präskriptiv normative Charakter dieser Vorgehensmodelle von verschiedenen Seiten kritisiert. Empirische Untersuchungen belegen nämlich, dass das Handeln von Konstrukteuren abschnittsweise nicht den in der Konstruktionsmethodik existierenden sowie in der Lehre oft vorherrschenden eher normativ orientierten Vorgehensplänen und -modellen folgt (PAHL 1999 S.11 FF). Es gibt Hinweise, dass Anwender glauben, diese Beschreibungen seien nicht adaptierbar und für jeden Fall anwendbar [WALLACE 1991 S. 75 FF], obwohl Vorgehensmodelle nicht auf spezifische Probleme sowie auf bestimmte Personenmerkmale der Anwender zugeschnitten sind.

Diesen Missständen versucht das Münchener Vorgehensmodell [LINDEMANN 2005 S. 40] zu begegnen, indem es eine vernetzte und flexibel verwendbare Darstellungsform zeigt.

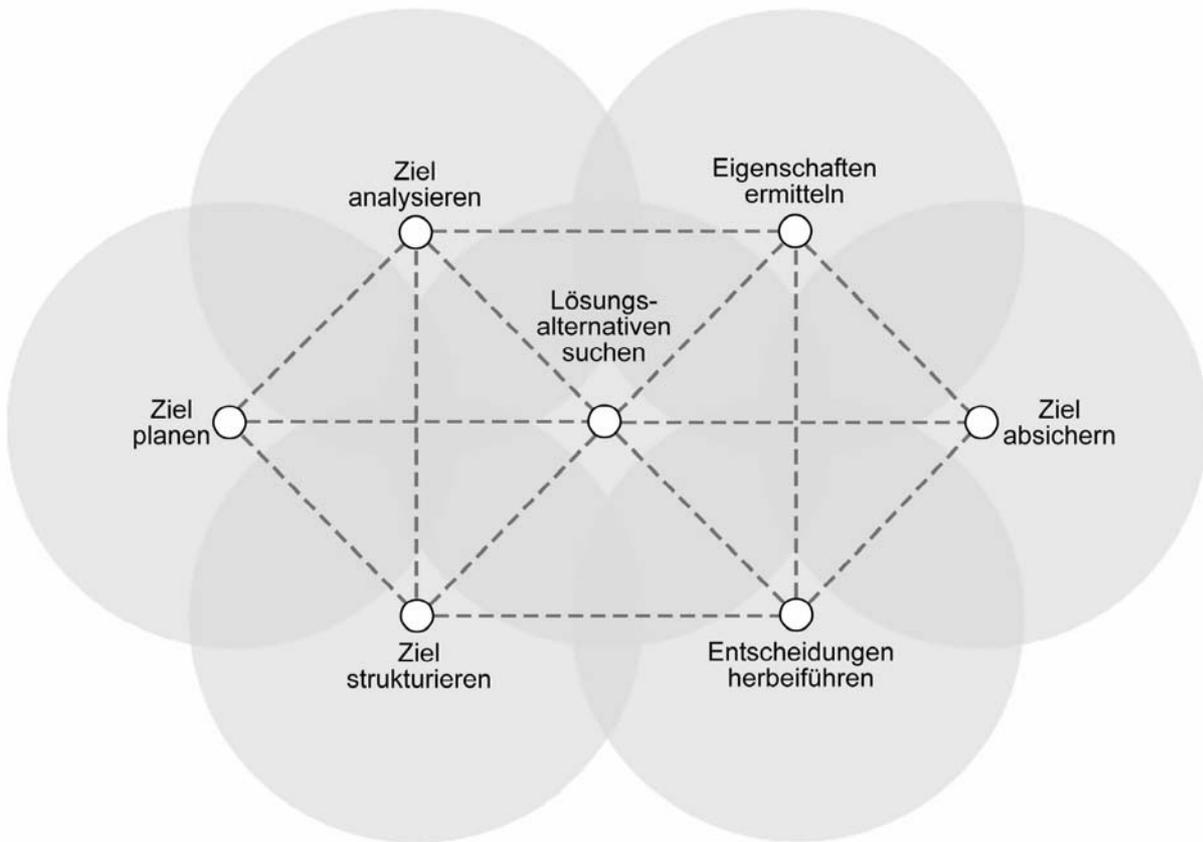


Abb. 2-5: Münchener Vorgehensmodell (MVM) [Lindemann, 2005 S. 40]

Dieses Modell existiert unabhängig von präskriptiven Vorgehenswegen und ermöglicht somit eine situationspezifische und anwenderorientierte Unterstützung von Problemlöseprozessen. Für erfahrene Entwickler stellt es die Form einer Checkliste mit weder immer zwingend noch unbedingt sequenziell abzuarbeitenden Teilzielen dar. Darüber hinaus bietet es zur Überwindung einer Synthesbarriere Musterwege zur Bearbeitung neuartiger Problemstellungen, wie sie sich für Novizen häufig stellen. Diese Musterwege sind standardisierte Vorgehensweisen, die sich in vielen Situationen als zielführend erwiesen haben. Ein Standardweg für typische Situationen in der Produktentwicklung ist der zickzackförmige Durchlauf durch das Modell mit der Bearbeitung aller Phasen in der Reihenfolge „Ziel planen“ – „Ziel analysieren“ – „Ziel strukturieren“ – „Lösungsalternativen suchen“ – „Eigenschaften ermitteln“ – „Entscheidung herbeiführen“ – „Ziel absichern“.

In dem Münchener Vorgehensmodell wird besonderer Wert auf die Problemklärung gelegt, indem sich insgesamt drei Teilelemente des Modells damit befassen. Ein gegenüber vielen Vorgehensmodellen ebenfalls besonderer Faktor ist das Vorhandensein eines reflektiven Ele-

ments „Ziel absichern“. Dieses Kontrollelement kann Fehler wie ein ballistisches Verhalten<sup>1</sup> verhindern.

Vorgehensmodelle bieten also einen roten Faden, wenn dem Entwickler ein Weg zur Zielerreichung nicht bekannt ist. Dies ist bei Syntheseproblemen sowie Interpolationsproblemen der Fall. Dennoch vermeiden sie nicht, dass Anwender einen für sich und ihre spezifische Situation und einen unangemessen Weg wählen und ausführen können. Denk- und Handlungsfehler sind möglich in Form eines Fehldeutens von Situationen, Fehlschließens sowie eines Fehlentscheidens für ein unangemessenes Vorgehen, was in ein Fehlplanen übergehen kann. Vorgehensmodelle beschreiben darüber hinaus nicht unbedingt ein erfolgreiches Vorgehen, da sie zahlreiche unter Umständen entscheidende Parameter außer acht gelassen werden. Schließlich geben Sie aufgrund ihrer speziellen Charakteristik auch keine unmittelbaren Handlungsdirektiven, die den Entwickler in den jeweiligen Handlungsschritten konkret unterstützen. So werden etwa Vorgaben gemacht, dass Lösungsalternativen generiert und bewertet werden, nicht aber wie.

## 2.5.2 Methoden

Ebenfalls über verallgemeinerte Heuristiken entwickelt, helfen Arbeitsmethoden dem Entwickler aufgrund ihres operativen Charakters für jeweilige Probleme und Situationen zielorientierte Handlungsanweisungen zur Verfügung zu stellen. Sie dienen als Ergänzung zu Vorgehensmodellen und können zur Erfüllung von Vorgehensschritten angewendet werden. Einzelne Methoden sind zwar tendenziell in entsprechenden Schritten bevorzugt anzuwenden, dennoch lassen sie sich auch in anderen Situationen einsetzen, um einen gewünschten Zweck zu erzielen. Methoden besitzen zwar üblicherweise eine (Haupt-)Wirkung, es gibt jedoch immer auch weitere Nebenwirkungen, die in der jeweiligen Anwendung zur bevorzugten Wirkung werden können [LINDEMANN 2005 S. 52].

Damit sind Methoden nicht starr und unreflektiert einzusetzen. Ein besonderer aber nicht immer einfach durchzuführender Aspekt ist die Adaption von Methoden an die jeweilige Situation. Dabei können Teile von Methoden weggelassen oder ergänzt oder durch Teile anderer Methoden ersetzt werden [HUTTERER 2005 S.94 ff]. Auch können Methoden selbst wiederum Teile übergeordneter Methoden sein.

Zusammenfassend lässt sich anmerken, dass Methoden von Vorgehensmodellen nicht so weit entfernt sind, wie häufig postuliert. Sie sind jedoch weitaus operativer zu verwenden und dienen diesen somit als Ergänzung.

---

<sup>1</sup> Ballistisches Verhalten bedeutet das Verzicht auf das „Betrachten der Effekte“ einer Handlung oder Entscheidung und auf das steuernde Eingreifen. Ähnlich einer Kanonenkugel, die ihre Flugbahn einmal abgeschossen nicht mehr verändert. [DÖRNER 2004 S. 309]

Erfolgreiche und fehlerarme Anwendung von Methoden hängt vor allem mit Erfahrungswissen bezüglich der Anwendung zusammen. Prozedurales Wissen beispielsweise über Randbedingungen und Situationsspezifika von Methoden führen nämlich zu Entscheidungen hinsichtlich einer unveränderten Anwendung, einer Adaption oder einer Neukombination von Methoden. Die Erfahrung des Verfassers in Methodenworkshops in der Industrie mit Entwicklern und mit Studenten im Rahmen eines Methodenpraktikums oder bei der Betreuung von Studienarbeiten bestätigen, dass die Güte der Zielerreichung über die Anwendung jeder Methode ein allgemeines prozedurales Wissen erfordert. Unerfahrene Entwickler neigen dazu, ohne Hinterfragen vorgegebene Schritte bedingungslos auszuführen. Dies führt in vielen Fällen dazu, dass eine angewandte Methode nicht zum Erfolg führt. Die Folge kann eine generelle Frustration in Bezug auf die Verwendung von Methoden zur Lösung von Problemen sein. Während in einer solchen Situation ein auf sich allein gestellter Entwickler davon Abstand nimmt, weiterhin Methoden freiwillig auszuführen, kann ein Methodenmoderator helfen, das Handeln gemeinsam zu reflektieren und die Ursachen für das Versagen einer Methode zu ergründen. Methoden lassen sich durchaus mit Kochrezepten vergleichen. Genau wie bei diesen kann das Ergebnis misslingen, obwohl jeder Schritt wie beschrieben ausgeführt wird. Einzelne Schritte des Rezepts sind mitunter zu adaptieren, wenn etwa Zutaten fehlen oder statt eines Elektroherdes ein Gasofen vorhanden ist. Auch gibt es bei Rezepten viele uneindeutige Beschreibungen, die das Kochen nach Rezept nicht erleichtern, wie z. B. „mit Salz und Pfeffer abschmecken“, „aus den Zutaten ist eine ... anzufertigen“ oder „... es ist so viel Milch hinzuzugeben, wie der Teig es verlangt ...“ bei der der Anwender auf sich alleine gestellt ist. Gerade in solchen Situationen hilft einem nur ein Experte oder Erfahrung durch wiederholte Anwendung. Das Pendant zu dieser Problematik findet sich in vielen Methoden. So auch bei der Erstellung einer relationsorientierten Funktionsstruktur, in der nach nützlichen und schädlichen Funktionen gefragt wird. Das Wissen über die exakte und für eine jeweils spezifische Situation nützliche Formulierung jeder Funktion sowie über die optimale Größe der Gesamtstruktur bildet sich erst nach wiederholter Anwendung dieser Methode. Dieses Wissen liegt darüber hinaus meist zu einem geringen Grad explizit vor. Dies bedeutet, dass der Entwickler nicht immer genau weiß, warum er jetzt diese Methode „genau so“ anwendet. Die Explikation dieses impliziten Wissens ist selbst mit Schwierigkeiten verbunden, was zusätzlich den Transfer dieses Anwendungswissens in der Methodenlehre ebenso, wie in der Industrie von erfahrenen Produktentwicklern auf Novizen erschwert.

Methoden helfen Entwicklern beim Problemlösen, fehlendes deklaratives Wissen zu erwerben und in ein Problemmodell zu integrieren. Sie ermöglichen einerseits, im Gedächtnis oder außerhalb gespeicherte, bestehende Lösungen zu finden, andererseits auch neue Lösungen zu generieren, falls bestehende nicht für ein spezifisches Problem passend sind. Die Anwendung alleine garantiert jedoch nicht, dieses Wissen auch zu bekommen. Im Folgenden wird ein Beispiel aus einem Projekt vorgestellt, bei dem ein Produktentwickler trotz entsprechender Aus-

bildung, Motivation und entwicklungsmethodischen Vorgehens einen Fehler begangen hat, der in diesem Fall „nur“ zu erhöhten Fertigungskosten geführt hat. Produktentwickler, die dieses Beispiel lesen, fühlen sich sicherlich an die ein oder andere Situation in ihrem täglichen Arbeitsablauf erinnert, die vielleicht ähnlich verlaufen ist.

## 2.6 Fallbeispiel

In einem Projekt mit einem Hersteller von Türsystemen für Schienenfahrzeuge wurde über die Produktpalette eine Wertanalyse durchgeführt. Diese war notwendig, da der allgemeine Kostendruck, der inzwischen auch den Schienensektor erreicht hatte, sehr hoch war. Aufgabe war es, die Herstellkosten drastisch zu senken und gleichzeitig die Qualität der Produkte nicht bzw. nicht wesentlich zu verschlechtern, nach Möglichkeit sogar zu verbessern.

Im Zuge dieser Wertanalyse wurde die strategische Entscheidung getroffen, nach Möglichkeit alle Gussteile als Blechbiegeteile auszuführen. Diese sollten aus dem Rohblech mittels Laserschneiden ausgeschnitten und an Biegemaschinen in möglichst wenigen Einzelschritten zum Fertigteil gebogen werden. Zu dieser Entscheidung kam es, da über die Wertanalyse als relevante Anforderungen die schnelle Verfügbarkeit von Bauteilen bei geringen Material- und Fertigungskosten festgestellt wurden. Gleichzeitig ergab eine Vergleichsrechnung, dass für die Stückzahlen und die Varianz der Bauteile die Herstellung aus Guss unverhältnismäßig teuer gegenüber lasergeschnittenen Blechbiegeteilen war. Auch konnte so über eine Bündelung von Aufträgen besonders günstige Konditionen mit einem Zulieferer vereinbart werden, wohingegen bisher Mindermengenzuschläge bezahlt werden mussten. So wurden alle herstellkostenrelevanten Bauteile, die über Gießverfahren hergestellt wurden hinsichtlich einer günstigeren Fertigung bei gleichzeitiger Erfüllung von Anforderungen wie Festigkeit, Bau- raum, Korrosionsbeständigkeit, Sicherheit etc. überprüft. Dazu wurde ebenfalls ein Vorschlag skizziert, wie dieses Bauteil als Blechbiegeteil auszuführen sein könnte.

Im Rahmen dieser Überprüfung der Bauteile stieß man auf ein im Einsatz befindliches Bauteil, einen Spindelschlitten, welcher im Türantrieb für eine Führung und Übertragung erforderlicher Kräfte zur Türöffnung benötigt wurde. Dieses Bauteil wurde in einem Türsystem verbaut, das für Metro-Bahnen in städtischen Verkehrsbetrieben weltweit eingesetzt wird.

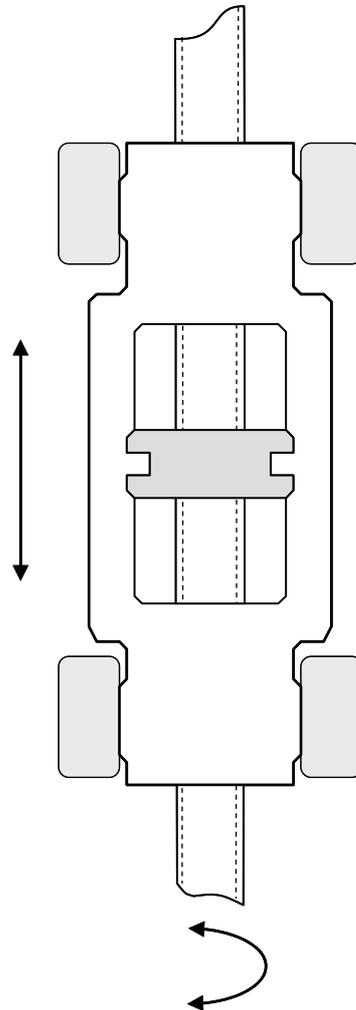


Abb. 2-5: Spindelschlitten Draufsicht

Der Schlitten ist als Kokillengussteil ausgeführt und besteht aus einer Messing-Aluminium-Legierung GK-CuZn 37 Al 1. Messing, besonders dieses  $\alpha$ -Messing (Zn-Gehalt kleiner 39 Prozent) gilt als gut warm umformbar aber schlecht zerspanbar [GROTE ET AL. 2004 S. E53]. Es zeichnet sich durch allgemeine Korrosionsbeständigkeit sowie durch eine besondere Unempfindlichkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion aus. Mit dem zusätzlichen Legierungselement Aluminium mit 1 Prozent handelt es sich um Sondermessing. Das Aluminium erhöht die Festigkeit, die Härte, Dichtheit, Feinkörnigkeit, Zunder- und Korrosionsbeständigkeit.

Dieses Bauteil wurde für die meisten Aufträge oberflächenunbehandelt in der abgebildeten Form verbaut. Es handelt sich weder um ein Sichtteil noch steht es in ständigen Kontakt mit korrosiv wirkenden Fluiden. Bei einem bestimmten Auftrag sollte ein Zug in Indien zum Einsatz kommen. Dort herrscht jedoch ein besonders feuchtwarmes, subtropisches Klima. Für

diese Bedingungen wurde der Türantrieb und in diesem Zusammenhang auch das vorgestellte Bauteil überarbeitet. Der verantwortliche Entwickler spezifizierte für das Bauteil zusätzlich einen metallischen Überzug aus Zink sowie einer anschließenden Pulverbeschichtung. Diese beiden Festlegungen wurden über methodisches und strukturiertes Vorgehen getroffen, indem zuerst die Einsatzbedingungen („feucht-warme Klimabedingung“) festgestellt und darüber die Anforderungen („Korrosionsbeständigkeit“) an das Bauteil festgelegt wurden, anschließend Lösungen gesucht und schließlich ausgewählt wurden. In welcher Tiefe Recherchen zum Korrosionsschutz und eine dazu stattfindende Lösungssuche stattgefunden haben, lässt sich im Nachhinein nicht vollständig sicherstellen, jedoch könnte die Information über korrosionsschützend erfolgreich verzinkte Karosserien bei Automobilen einen maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidung für diese Art des Korrosionsschutzes haben. Das Verfahren wird vor allem bei Stahlblechen eingesetzt und vermeidet Korrosion einerseits aufgrund des metallischen Überzugs selbst, andererseits aufgrund seiner kathodischen Schutzschicht, indem dieser durch das geringere elektrolytische Potenzial eine Opferanode für ein höherwertiges Trägermaterial darstellt. Selbst eine Verletzung dieser Schutzschicht führt somit nicht zur Korrosion des zu schützenden Materials. Auch das Pulverbeschichten wird als Korrosionsschutz bei Fahrzeugen, insbesondere bei Rahmenteilern angewendet und überwiegend bei Umwelteinflüssen exponierter und beanspruchter Oberflächen eingesetzt. Hierzu wird nach entsprechender Vorbehandlung ein elektrisch geladener Pulverlack auf eine Oberfläche aufgebracht und anschließend eingebrannt. Das Verfahren gilt als lösungsmittelfrei und Ressourcen schonend, ist aber üblicherweise teurer als einfaches Lackieren.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass in diesem Fallbeispiel dem Bauteil ein dreifach wirkender Korrosionsschutz zuteil wurde. Messing gilt als korrosionsbeständig und wird, häufig in ähnlichen Legierungen mit Nickel oder Mangan oder Zinn, sogar als Schiffsbeschlag in vielfältiger Weise benutzt, ohne am Salzwasser besonderen Schaden zu nehmen. Es bildet unter Anwesenheit von Sauerstoff wie auch Aluminium eine passive Oberfläche, die selbst weitere bauteilschädigende Korrosion verhindert. Jedoch spricht man bei Messing nicht von Passivierung sondern von oxidiertem bzw. patiniertem Messing. Auch Entzinkung und Spannungsrisskorrosion stellen bei der verwendeten Legierung unter den gegebenen Einsatzbedingungen kaum ein Problem dar. Einzig die Unbeständigkeit gegenüber Ammoniak ist ein Nachteil von Messing, weshalb in Stallungen für Großviehbetriebe auf dieses Material verzichtet wird. Der Entwickler ließ also dieses Bauteil offensichtlich unnötigerweise zusätzlich verzinken und pulverbeschichten. Beide Verfahren führten somit zu einer höheren Fertigungszeit und damit zu höheren Kosten.

Warum hat der verantwortliche Ingenieur diese „falsche“ Entscheidung getroffen, wie kam er auf die Informationen zum Korrosionsschutz, wieso fehlten ihm die notwendigen Informationen zum Materialverhalten von Messing, die ihn zu einer anderen Entscheidung hätten bringen können? Schließlich hat er ja genau diese Legierung bewusst gewählt. Dies sind alles

Fragen, die sich in diesem Zusammenhang stellen lassen, deren Beantwortung allerdings kaum bis gar nicht gelingt.

Feststellen lässt sich als Fazit jedoch, dass es in diesem Beispiel trotz des hohen Potenzials eines methodischen Vorgehens [BIRKHOFER 2004] zu fehlerhaften Entscheidungen kam, die in einem nicht optimalen, weil für die Erfüllung der Anforderungen zu teurem Produkt mündeten. Die Hintergründe hierfür sollen im folgenden Kapitel näher erörtert werden.

## 2.7 Die Schwierigkeit der richtigen Information zum Problem

Der Entwickler aus dem vorangegangenen Beispiel hatte zur Problemlösung neben einem ausreichend prozeduralen Wissen einen gewissen Umfang an deklarativem Wissen. Dieser Wissensstand bildet die Voraussetzung für die Effektivität von Folgeschritten [LINDEMANN 2005 S. 21]. Dass dieses für den speziellen Fall jedoch nicht ausreichend war, dessen war er sich nicht bewusst. Daher unterließ er in diesem Fall auch eine bewusste Reflexion, ob das vorhandene Wissen eine richtige Entscheidung ermöglicht. Es ist für jeden nachvollziehbar, dass mangelndes oder Nicht-Wissen zu Fehlentscheidungen führen kann. Der Entwickler hielt sich auf diesem Gebiet jedoch für einen Experten und zweifelte wohl nicht an den getroffenen Festlegungen. Dieses Verhalten erinnert an das Verhalten der leitenden Ingenieure, die am 26. April 1986 die Katastrophe in Tschernobyl verursachten [DÖRNER 2004 S. 47 ff]. Was bedeutet aber „ausreichend Wissen“ beim Konstruieren? Kann man überhaupt genug Wissen besitzen, um immer eine optimale Lösung zu einem Problem präsentieren zu können? Wissen wird gebildet, indem Information in einen bestimmten Zusammenhang gebracht wird [MILLARD 2001 NACH GRAEBSCH 2005 S.20]. Die Information selbst kann aufgenommen, bzw. aus (Roh-)Daten generiert werden, die entschlüsselt und interpretiert werden müssen. Neben der Informationssuche bzw. -generierung, ist die Informationsverarbeitung und -umsetzung als entscheidend zu betrachten. Wissen selbst kann allerdings nicht übertragen werden, die dafür relevante Ebene ist die der Information.

Damit lässt sich ableiten, dass auch das zentrale Element der Problemlösung das Generieren, spezieller das Finden geeigneter Information zu sein scheint. Denn erst durch die Information selbst kann diese verarbeitet und damit zu Wissen werden. Vorgehensmodelle und Methoden genügen sicherlich, mögliche Wege zu finden, die eine Unterstützung bieten, Informationen zu finden, doch nicht zwangsläufig, die richtige Information für ein vorliegendes Problem zu finden. Die besondere Bedeutung der Informationssuche wird auch durch die Tatsache bestärkt, dass in Produktentwicklungsprozessen der Zeitanteil der Informationssuche in der Regel bei ca. 30 Prozent liegt [EHRENSPIEL 2003 S. 493].

Information selbst kann verschlüsselt oder unverschlüsselt in einer bestimmten Form vorliegen, wie textuell, grafisch oder verbal, sie besitzt jeweils einen bestimmten Umfang und eine

entsprechende Güte. Die Informationsqualität selbst ist jedoch nicht so einfach festzustellen. Welche Information hilft dem Entwickler bei der Problemlösung, welche führt ihn „auf die falsche Fährte“? Im Zusammenwirken mit dem Zeitbedarf zur Informationssuche und -verarbeitung wird bei der Forschung für ein Lean Product Development, einer schlanken Produktentwicklung, seit einiger Zeit versucht, Qualität von Information zu ermitteln und diese in „Value“ und „Waste“ zu kategorisieren [BAUCH 2004, GRAEBSCH 2005]. Dazu wurden so genannte „Wastedriver“, also Verursacher von „Waste“ ermittelt und ein Monitoringsystem entwickelt. Das Problem, das bleibt, ist die Tatsache, dass unnütze Informationen, die eine Zeitverschwendung verursachen, erst im Nachhinein eines Prozesses festgestellt werden können. Information kann allerdings nicht nur unnützlich sein, sie kann im schlimmsten Fall auch schaden und eine falsche Interpretation und damit ein falsches Wissen verursachen. Hier kommt zusätzlich das menschliche Verhalten zum Tragen, dass Menschen vorwiegend nur nach bestätigender Information suchen und eine kritische Betrachtung des erstellten explizit bzw. implizit formulierten Realitätsmodells bevorzugt unterlassen [MÈRÖ 2000 S. 271, GADENNE ET AL. 1986]. DÖRNER schreibt hierbei von einer hypothesengerechten Informationsauswahl [DÖRNER, 2004 S. 135]. Informationen verfügen schließlich auch über eine unterschiedliche Güte dadurch, dass sie exakt oder nur unscharf formuliert sind [LINDEMANN 2005 S. 9]. Unscharfe Information erschwert eine Interpretation und damit zusätzlich den Aufbau von Wissen. Dies alles führt zu falschen Hypothesen [DÖRNER 2004 S. 64] und schließlich zu Fehlentscheidungen. Die Bedeutung von passender Information in diesem Zusammenhang, vor allem hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, dem Detaillierungsgrad sowie der Schärfe wird auch von vielen weiteren Autoren betont [PAHL ET AL. 2004 S. 65, KIENECKER 1999 S. 622; ULLMAN 1997 S. 32].

Bei empirischen Untersuchungen wurden in verschiedenen Industrieunternehmen wesentliche Einflussfaktoren und deren Mechanismen auf den Konstruktionsprozess in kritischen Situationen untersucht [FRANKENBERGER 1997, BADKE-SCHAUB ET AL. 2003]. Auch wenn für unterschiedliche Typen kritischer Situationen verschiedene Mechanismen nachgewiesen werden konnten, so war dennoch die Informationsverfügbarkeit in allen beobachteten Prozessen der zentrale Faktor, der für alle kritischen Situationen den bedeutendsten Einfluss auf das Konstruktionsergebnis darstellte. Ein weiteres Ergebnis dieser Untersuchung war, dass äußere Rahmendbedingungen Einfluss auf das Informationssuchverhalten von Personen haben. So führt subjektiv empfundener hoher Zeitdruck zu einer Reduktion des Anspruchsniveaus, was in der Folge zu reduzierter Informationssuche führt. Dies bedeutet nicht notwendigerweise eine erfolglose Problemlösung. Eine Reduktion von Information ist schließlich fast immer notwendig, um ein Realitätsmodell zu erstellen und effektiv Probleme lösen zu können. Allerdings stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt, an welcher Stelle und in welchem Ausmaß die Reduktion erfolgt. Führt die reduzierte Informationssuche nämlich dazu, dass der Entwickler sich auf einen oder wenige Bereiche fixiert, fallen potenziell wichtige Informatio-

nen nicht in den Suchraum des Entwicklers. Dies kann nicht nur im individuellen Entwicklungsprozess zu Fehlentscheidungen, zu zeitlichen Verzögerungen und unerwünschten Iterationen führen.

### 2.7.1 Informationsbausteine

Die richtige Information, deren erfolgreiche Suche und eine entsprechende Interpretation sind hinsichtlich des Aufbaus von Wissen und der darauf basierenden richtigen Entscheidung in jeder Phase des Problemlösens relevant. Diese Information ist bei der erfolgreichen Durchführung einer Planung, Analyse und Strukturierung von Zielen, einer Suche nach Lösungsalternativen, einer Ermittlung ihrer Eigenschaften, der Auswahl einer Erfolg versprechenden Lösung sowie der Absicherung des Erreichten unverzichtbar. Basiert in einer dieser Phasen eine Entscheidung auf einer selektiven, unnützen oder sogar falschen Information, so kann es zu Fehlentscheidungen mit weitreichenden Folgen in dieser oder in nachfolgenden Phasen kommen.

Die schnelle, einfache, vor allem aber „richtige“ Informationsidentifikation, -selektion und -nutzung ist aber vor allem von der Art der Bereitstellung der Information abhängig. Menschen als Problemlöser schreiben der Einfachheit des Zugriffs, der Überschaubarkeit des Aufwands und Nutzens sowie der Adaptionmöglichkeiten auf das eigene Problem eine entscheidende Rolle zu. Allerdings mangelt es für eine spezifische Gestaltung und Aufbereitung von Informationsquellen zur Vermeidung einer ineffizienten und reduzierten Informationssuche und -nutzung an relevanten Modellen personen- und situationspezifisch erfolgreicher Informationssuchstrategien.

Betrachtet man den Prozess der Informationsidentifikation, -selektion und -nutzung in einem Entwicklungsprozess, lässt sich dieses anhand eines Modells von Informationsbausteinen gut verdeutlichen. Das erforderliche Wissen zur Entwicklung eines Produkts bildet sich aus der Summe vieler einzelner Bausteine aus einzelnen Informationen, die analog der Erstellung eines Gebäudes zu einem Bauwerk aus „Informationsbausteinen“ zusammengesetzt sind, also in einen Zusammenhang zu bringen sind. Nahezu parallel zum entstehenden Produkt bildet sich so ein „Wissensbauwerk“ dieser Produktentwicklung. Ebenso wie einzelne Ziegelbausteine zusammengesetzt nicht mehr die Bausteine selbst sondern ein Bauwerk darstellen, welches zum Beispiel den eigenen Begriff „Haus“ oder „Brücke“ besitzt, werden auch einzelne Informationsbausteine miteinander kombiniert und erreichen dadurch eine neue Ebene. Aus Information wird so Wissen, zu einem Problem eine Lösung generiert. Zu Beginn einer neuen Problembearbeitung liegen auf dieser Baustelle der Produktentwicklung die Bausteine noch ungeordnet, zum großen Teil auch noch unvollständig vor. Die Bausteine müssen gesucht und miteinander kombiniert, fehlende Bausteine herangeschafft und schließlich zu ei-

nem Gebilde formiert werden. Idealerweise entstehen so mit dem Produktfortschritt einzelne Mauerwerke aus miteinander zusammengefügte Informationen, die schließlich für beispielsweise vorhandene Problemmodelle oder zu treffende Entscheidungen das nötige Wissen bilden und als Wissensbauwerk in Gestalt und Funktion diesen Zielvorgaben entsprechen.

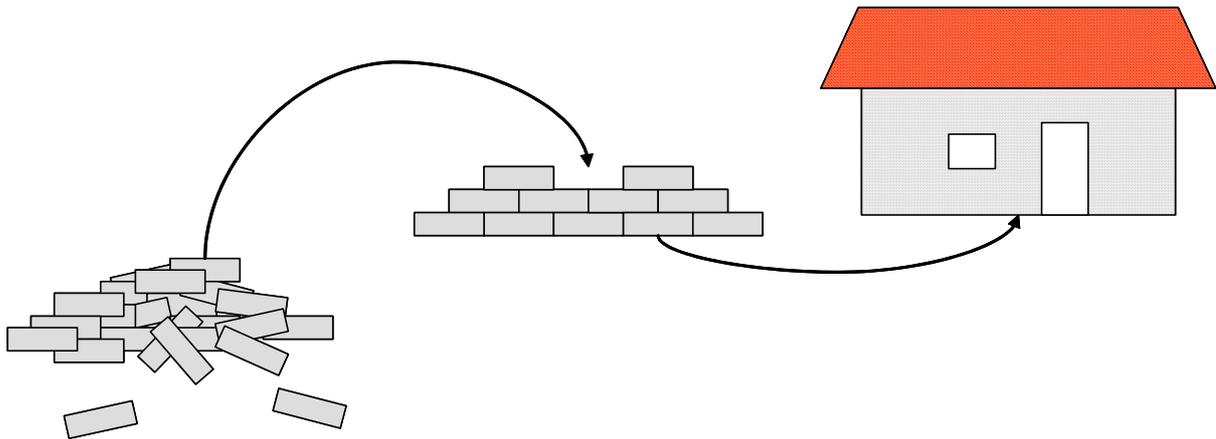


Abb. 2-6: Wissensaufbau aus Informationsbausteinen

### 2.7.2 Wissenslücken

Bei diesen Schritten kann es jedoch vorkommen, dass einzelne Bausteine fehlen, weil sie entweder nicht vorhanden sind oder in dem ungeordneten Bausteinhaufen nicht zu entdecken sind. Diese fehlenden Bausteine stellen Lücken dar. Das Bauwerk bzw. das Produkt kann schließlich nicht oder nur fehlerhaft erzeugt werden. Daher gilt es, diese Lücken zu schließen, um ein kohärentes Gebilde, also eine erfolgreiche Produkterstellung, sicherzustellen. Lücken können dabei ebenso wie der oder die zugehörigen Baustein(e) unterschiedliche Ausmaße besitzen. Dieser kann die einfache Antwort auf die Frage (=Lücke) sein, ob Messing in einem bestimmten Fall verzinkt werden muss oder nicht. Es kann aber ebenso die Information über den gesamten Hintergrund sein, wie die Information über Materialwerte, Oberflächenbeschaffenheit, elektrolytische Spannungsreihe und alternative Korrosionsschutzverfahren.

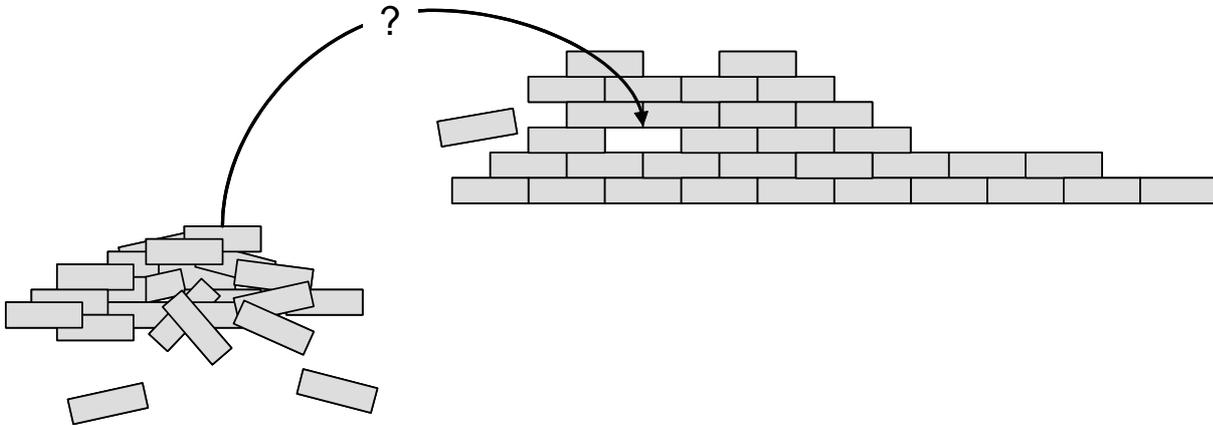


Abb. 2-7: Wissensbauwerk und Lücken

Ist ein in der Lücke fehlender Baustein klar definierbar und sichtbar vorhanden, so muss – gemäß der Unterscheidung von Aufgabe und Problem [DÖRNER 1987] – lediglich die Aufgabe abgearbeitet werden, d.h. es gilt, den als fehlend erkannten Baustein aufzunehmen und an der entsprechenden Stelle einzusetzen. Ist die Beschaffenheit des in die Lücke einzusetzenden Bausteins oder der Ort, an dem dieser zu beschaffen ist, nicht bekannt, so ergibt sich ein Problem.

Häufig ist die Information einfach nur nicht vorhanden, aber mitunter liegt die größere Schwierigkeit darin, dass Informationen in einer Informationsflut verborgen sind. Mehr Information heißt nicht mehr Wissen [VESTER 2000 S. 50]. Aus einer großen Menge an Informationsbausteinen denjenigen herauszufinden, der die vorhandene Lücke schließen kann, kann zu einem umfangreichen, manchmal unmöglichen Unterfangen ausarten. Gerade in der heutigen Zeit, wo eine Vielfalt an Information jederzeit schnell über Medien, wie dem Internet verfügbar gemacht wird. Das Problem ist jedoch meist noch nicht einmal gelöst, wenn der Baustein schließlich gefunden, ist. Der Informationsbaustein muss dafür erst in die vorhandene Lücke eingepasst, d. h. in den richtigen Kontext gebracht werden. Dazu muss Information, die in einem bestimmten Zusammenhang eingebettet war auf das vorliegende Problem übertragen werden. Der Baustein, der in einem anderen Bauwerk verarbeitet war, muss entsprechend bearbeitet werden, um in die vorhandene Lücke zu passen. So kann das benötigte Wissen schließlich erzeugt und das Problem gelöst werden. Lücken und deren Schließung sind somit eine äußerst subjektive Erscheinung und von Personenmerkmalen und von den, auf handelnde Personen wirkenden, äußeren Einflüssen abhängig. Information liegt in der Regel zwar objektiv vor, die Verarbeitung dieser in Form der Interpretation stellt allerdings eine durchaus subjektive Handlung dar. Popper spricht in diesem Zusammenhang von subjektivem

und objektivem Wissen [POPPER 2002 S.23]. Eine Information muss eine Passgenauigkeit besitzen, um sich exakt in eine Lücke zu fügen. Sie muss auch in einer für den Entwickler „passenden“ Form vorliegen, um von diesem adäquat verarbeitet und eingepasst werden zu können. Die Informationsqualität ist somit entscheidend dafür, ob das Wissensbauwerk schließlich eine Tragfähigkeit aufweist oder nicht.

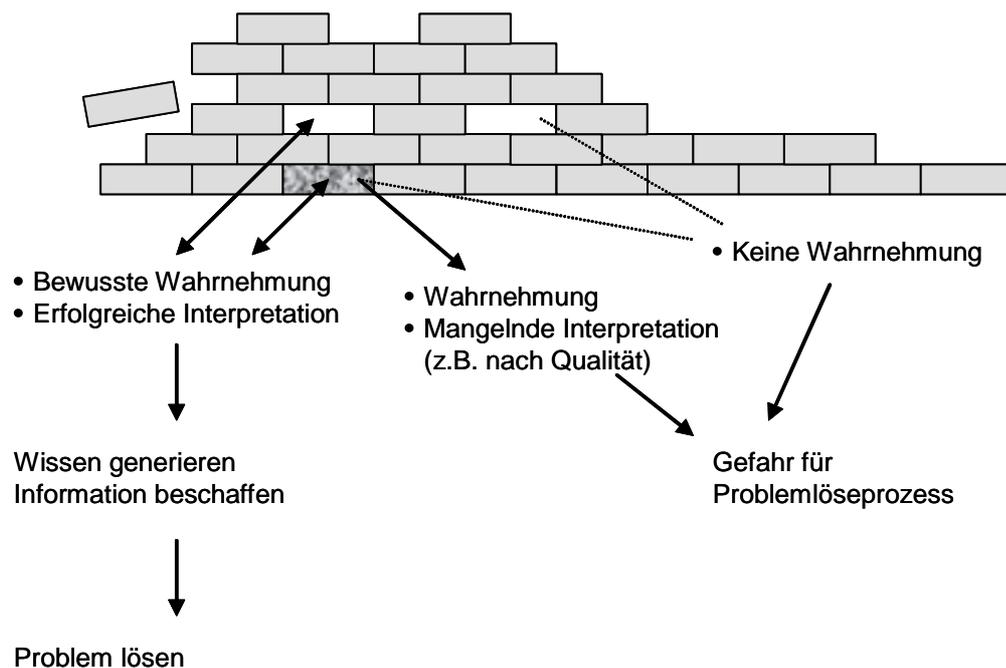


Abb. 2-8: Wahrnehmung und Folgen von Lücken

Es kann durchaus auch vorkommen, dass eine Lücke im Entwicklungsprozess nicht erkannt beziehungsweise mangelnd interpretiert wird und zu einem „scheinbar richtigen“ Wissen führt. Dies ist insofern kritisch, da eine Entwicklung unter falschen Voraussetzungen zu Produktfehlern oder zumindest zu späten und teuren Änderungen führen kann. Das Wissensgebilde scheint äußerlich zwar unversehrt und vollständig, ist jedoch nicht belastbar. Das ganze Gebäude kann so im schlimmsten Fall einstürzen. Tragisch ist dies vor allem dann, wenn auf einem nicht belastbaren Fundament aufgesetzt und über lange Zeit weitergebaut wird. So kann auch ein völlig falsches Wissensbauwerk entstehen. Unterbleibt nämlich eine Reflexion bzw. das kritische Hinterfragen bestimmter Schlussfolgerungen und Entscheidungen, so kann mitunter viel Zeit bis zu der Erkenntnis vergehen, dass diese Schlussfolgerung oder Entscheidung, welche auf mangelnder Information und damit auf fehlerhaftem Wissen basiert, als fehlerhaft erkannt wird und bereits zu einem Mangel in einem Produkt geführt hat. So kann es passieren, dass sich dann dieses Produkt schon am Markt und beim Kunden befindet.

Die Schwierigkeiten beim Problemlösen im Allgemeinen und der Produktentwicklung im Speziellen stellen folgende Aspekte dar:

- Das Erkennen von Wissenslücken im Wissensbauwerk.
- Das zweckmäßige Suchen und Finden der passenden Informationsbausteine zur Schließung vorhandener Lücken.
- Das Anpassen der zur Verfügung stehender Bausteine zum erfolgreichen Einpassen der Informationsbausteine.
- Das erfolgreiche Einsetzen sowie das Überprüfen der Festigkeit des entstehenden Bauwerks.

### 2.7.3 Wissen generieren

Wie wird nun die notwendige Information gesucht, um als Baustein in erkannte Wissenslücken eingesetzt zu werden? Dies stellt für Menschen oft ein Problem dar, welches mit den beschriebenen Vorgehensweisen bearbeitet wird. Damit sind allerdings auch die gleichen Fehler möglich. Die eine kognitive Ursache für Fehler im Denken und Handeln, das unvollständige Wissen bei einer Problembearbeitung soll ja durch den Wissensaufbau, also der Informationssuche, -selektion und -umsetzung vermieden werden. Genau hier kollidiert der Suchende mit der zweiten kognitiven Ursache für Fehler, der beschränkten Rationalität des Menschen. Durch Strategien der Handlungsoptimierung, wie Similarity Matching und Frequency Gambling wird ein Problem zu einem Problemmodell abstrahiert, wodurch unter Umständen notwendige Informationen unbeachtet bleiben. Auch mögliche Lösungen aus einem Wissensspeicher werden, aus dem Zusammenhang gerissen, informationsreduziert übernommen. So passieren schließlich die mit einer Handlungsfolge behafteten Denkfehler, sodass beispielsweise Bauteile aus Messing für den Einsatz in subtropischem Umfeld (= informationsreduziertes Problemmodell) zusätzlichen Korrosionsschutz durch eine Zinkschicht und eine Pulverbeschichtung erfahren (= unreflektierte und abstrahierte Übernahme von Information aus einem Wissensspeicher). Die Information „Einsatz in subtropischem Umfeld“ wurde in diesem Fall nicht kritisch hinterfragt, sondern mit gespeicherten Mustern in Einklang gebracht und vorhandene Lösungen unreflektiert übernommen.

Nun ist die Fähigkeit zum Musterabgleich auch gleichzeitig eine der hohen Ressourcen des Menschen [REASON 1992 S. 95]. Das Erkennen und Auswählen von Information und deren Verarbeitung machen den Menschen als Experten immer noch besser als die leistungsfähigsten Computer, auch wenn dieser Informationsverarbeitungsprozess als implizites Wissen nicht immer explizit begründbar ist [HERBIG 2001].

In vielen Fällen ist genau dieses Vorgehen auch sehr erfolgreich. Nicht immer ist es notwendig, alle Information zu kennen, um die richtigen Denkschritte auszuführen. Fuzzy Logic als anerkannte Theorie beweist als Lehre der Unschärfe unterstreicht diesen Ansatz [z. B. VESTER 2000 S. 150 ff]. Jede mögliche Information zu ermitteln ist keinesfalls effizient. Es ist unmöglich, immer alle möglichen kausalen Zusammenhänge zu erkennen und jede eruierte Information in eine denkbare Entscheidung mit einzubeziehen. Hat man allerdings nur wenig Information zur Verfügung oder bedeutet das Ermitteln umfassender Information einen unannehmbar hohen Aufwand, so ist es entscheidend, dass die zur Verfügung stehende Information eine ausreichende Genauigkeit und Richtigkeit hat.

Wichtig ist in dieser Situation, dass Ziele ausreichend beschrieben sind. Dies bedeutet, dass die Problemstellung durchdrungen und die Bedeutung von Interdependenzen erkannt sein müssen [DÖRNER 2004 S. 141 ff]. Die Mustererkennung kann durch geeignete methodische Unterstützung forciert werden, eine Vermengung unterschiedlicher Systemebenen sowie eine zu hohe Detaillierung der Systembetrachtung schaden – so die Lehrmeinung – der Mustererkennung. Die darüber gefundenen Lösungsalternativen sind bezüglich ihrer Tauglichkeit kritisch zu hinterfragen. So kann bereits ein unterschiedlicher Parameter in den jeweiligen Umfeldern die Übertragung einer Lösungsalternative auf die vorhandene Problemstellung unmöglich machen. Um zum Fallbeispiel zurückzukommen: Das Verzinken von Stahlblechen ist eine gängige und äußerst intelligente Möglichkeit des Korrosionsschutzes. Einerseits bildet der Überzug eine Schutzschicht, die den Kontakt korrosionsfördernder Medien mit dem korrosionsfähigen Material unterbindet, was jedoch eine vollständige Beschichtung erfordert. Der weitaus bedeutendere Effekt dieser Kombination liegt in der elektrolytischen Spannungsreihe begründet. Selbst bei einer verletzten Schutzschicht, kommt es nicht zur Korrosion des Trägermaterials sondern nur zu der der Beschichtung. Bevor also eine Korrosion am Blech eintritt, muss erst die gesamte Zinkschicht korrodiert sein. Dies macht diese Art des Schutzes so überaus effektiv. Wird anstatt des Trägermaterials Stahlblech in einer neuen Situation ein aluminiumhaltiger Werkstoff verwendet und der Entwickler stößt über eine Mustererkennung „Korrosionsschutz“ auf die Möglichkeit des Verzinkens, so hat er in diesem Fall bereits zwei gravierende Fehler gemacht. Einerseits korrodiert Aluminium im Regelfall zu einer passivierten Schutzschicht, die keine zusätzliche Beschichtung erfordert, der zweite, gravierendere Punkt ist jedoch, dass Aluminium in der elektrolytischen Spannungsreihe unedler als Zink ist, somit als Trägerwerkstoff selbst zur Opferanode des zum Schutz aufgebracht Zinks wird und bei mechanischer Beanspruchung an bestimmten Stellen eine zusätzliche Beanspruchung des Materials auftritt. Der überragende Effekt des Korrosionsschutzes durch Zink dreht sich in diesem Fall ins Gegenteil um, sobald der eine Parameter „Trägermaterial“ von Stahl auf einen Werkstoff verändert wird, der unedler als Zink ist.

## 2.8 Fehlerrelevante Handlungen beim methodischen Vorgehen

Methoden und Vorgehensmodelle helfen Entwicklern, einen Weg zu finden, ein Ziel zu erreichen. Sie helfen, notwendige Informationen zu erarbeiten, um Wissen zu generieren und ermöglichen durch diese Art der Unterstützung, die unter Umständen richtigen Entscheidungen zu treffen. Was sie aber keinesfalls gewährleisten können, ist die garantiert richtige Information überhaupt zu bekommen. Selbst wenn für die vorliegende Situation und die vorhandenen Randbedingungen das richtige Vorgehen gewählt und ausgeführt wird.

Die Schwierigkeiten, die bei der Anwendung eines methodischen Vorgehens auftreten können, betreffen hingegen alle Phasen des Vorgehens einer Entwicklung, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Entscheidung, die richtige Methode anzuwenden.
- Die Entscheidung, eine Methode nach Vorgabe oder adaptiert anzuwenden.
- Die Entscheidung, welche Elemente einer Methode wie zu adaptieren sind.
- Die Entscheidung, wann eine Methodenanwendung abgebrochen werden kann.
- Die Entscheidung, wann von einer Phase in die nächste gewechselt werden kann.
- Das Erkennen und die Auswahl der für eine Problemstellung relevanten Information.
- Die Interpretation und der Aufbau eines belastbaren Wissensbauwerks zur Lösung von Problemstellungen in Entwicklungsprozessen.

Die aufgezählten Schwierigkeiten eines methodischen Vorgehens zur Informationsfindung und Wissensgenerierung beginnen bereits mit der Entscheidung, eine Methode anzuwenden. Diese Entscheidung, ob eine Methode notwendig und auszuführen ist, kann zu einem Fehler führen. Die Anwendung einer intuitiv-assoziativen Methode zur Generierung von alternativen Lösungen wird der pragmatische Entwickler auslassen, wenn er bereits eine erste Lösung gefunden hat. Diese kann sich allerdings zu einem in nachfolgenden Schritten suboptimalen Produkt entwickeln, weil die erste „scheinbar“ funktionierende Lösung zur Anwendung kommt. Auch ist das Zurückgreifen auf Alternativen nicht möglich, falls die gewählte Lösung den Anforderungen nicht standhält.

Entwickler wenden Methoden häufig nach Rezept und nicht situativ adaptiert an. Auch hier kann es zu zeitlichen Verzögerungen oder Fehlentscheidungen im Prozess kommen. Eine FMEA<sup>1</sup> [REINHART ET AL. 1996] ist nicht zwangsläufig mit der Erstellung einer Risikoprioritätszahl (RPZ) durchzuführen. Auch eine einfache Bewertung oder eine Expertenbefragung

---

<sup>1</sup> Failure Mode And Effects Analysis, im Deutschen oft frei, aber missverständlich als Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse bezeichnet. Mit dieser Methode werden in erster Linie weniger „Fehler“ sondern potenzielle Versagensmöglichkeiten, vor allem bei Produkten und Prozessen, ermittelt.

kann eine langwierige Diskussion um Wertzuweisungen und Fehler aufgrund blinden Zahlenglaubens vermeiden.

In diesem Zusammenhang ist die Entscheidung hinsichtlich der Frage, wie eine Methode zu adaptieren ist, ebenfalls kritisch. Lässt man bestimmte entscheidende Schritte, oft nur aus Unwissenheit, weg oder verändert diese, so kann dies dazu führen, dass die Methode selbst nicht mehr zum gewünschten Erfolg führt. Eine relationsorientierte Funktionsstruktur beispielsweise wird in der Regel mit Funktionen beschrieben, die aus einem Substantiv und einem Verb gebildet werden. Erfahrungen aus Fallstudien zeigen, dass nicht nur methodisch schlecht geschulte, sondern schon die meisten Anwender, denen die Erfahrung mit dieser Methode fehlt, weil sie diese etwa zum ersten Mal anwenden, zu gerne auf diese sicherlich „unnatürliche und einzwängende“ Vorgabe zur Ausführung verzichten. In den meisten Fällen führte das dazu, dass so ein nötiges Systemverständnis suboptimal bis gar nicht aufgebaut wurde und damit der Erfolg dieser Methode ausblieb. Auch nachfolgende Schritte der Methode bauen auf dieser ungewohnten aber genauen Formulierung auf und können so ebenfalls nicht ausreichend bearbeitet werden.

Jede Methode hat einzelne Handlungsschritte, die abzuarbeiten sind. Es finden sich in den Beschreibungen überwiegend Formulierungen, die zwar angeben, was zu tun ist, aber nicht, in welcher Form. Eine relationsorientierte Funktionsstruktur kann für das gleiche Produkt aus 20 oder 200 Funktionen mit zugehörigen Relationen erstellt werden. Hier spielt die Wahl der richtigen Abstraktion und der Systemgrenze eine entscheidende Rolle. Erfahrungen aus Industrieprojekten und mit Studenten zeigen, dass die Bearbeiter bei vielen Methodenanwendungen Schwierigkeiten haben, ein Ende dieser Anwendung festzulegen. Dies ist vor allem dann nicht leicht, wenn sich die Güte von Ergebnissen einer Methodendurchführung erst in nachfolgenden Schritten des Entwicklungsprozesses zeigen. Etwa, wenn aus Funktionen Handlungsschwerpunkte abzuleiten sind oder zu diesen Lösungsalternativen generiert werden sollen ist die je nach Bedarf entsprechend abstrakte und somit „richtige“ Formulierung dieser Funktionen entscheidend.

Hier kommt noch eine weitere Schwierigkeit zum Tragen, nämlich die Frage, wann von einem Schritt des Produktentwicklungsprozesses in den nächsten gewechselt werden kann. Wann sind die Anforderungen ausreichend formuliert? Sind ausreichend Lösungsalternativen gefunden, um ein gutes Produkt zu erstellen oder muss noch weiter gesucht werden? Das sind häufige Fragen, die sich wohl jeder Produktentwickler schon mal gestellt hat. Auch hier gibt es keine grundsätzlich gültige Antwort und klare Kriterien, die den Wechsel aus einer Phase in die nächste entscheiden.

Doch diese kritischen Punkte alle richtig entschieden und ausgeführt zu haben, heißt noch lange nicht, die zur Problemlösung richtige und hilfreiche Information zu bekommen. Auf sie kann man zwar bestenfalls durch die Methodenanwendung gestoßen werden. Es kann aller-

dings auch vorkommen, dass keine Information gefunden wird, weil keine existiert oder weil sie trotz methodischen Vorgehens an unbekannter Stelle oder in einer Informationsflut verborgen bleibt. Findet sich sehr viel Information zu einer Problemstellung, so muss diese bewertet und sinnvoll ausgewählt werden.

Die gefundene und ausgewählte Information ist sinnvoll zu verdichten oder in anderer geeigneter Form zu interpretieren, sodass ein Mauerwerk aus Wissen und schließlich ein gewünschtes Wissensgebäude entstehen können. Dabei müssen einzelne Informationsbausteine zusammengesetzt werden oder in vorhandene Lücken eingepasst werden. Häufig lässt sich im Laufe des Produktentwicklungsprozesses feststellen, dass für viele fehlerhafte Entscheidungen, die zu späten Änderungen im Prozess geführt haben, die richtige Information zwar vorgelegen hat, aber nicht beachtet wurde. Dies bedeutet, dass Informationen nicht nur verarbeitet werden müssen, sondern dass schlussendlich aufgrund des erzeugten Wissens auch „richtige“ Entscheidungen für eine erfolgreiche Problemlösung getroffen werden müssen. Bei diesem Schritt tritt möglicherweise ein Fehler auf, auch wenn die Handlungen bis dahin fehlerfrei waren.

Methodisches Vorgehen kann also durch das „Wissen wie“ helfen, ein „Wissen was“ aufzubauen, um so Fehler zu vermeiden, lässt dabei aber den Entwickler in bestimmten kritischen Fragestellungen allein und kann daher allein nicht verhindern, dass in jedem einzelnen Schritt weitere Fehler möglich sind. Methodisches Handeln impliziert unter Umständen Verhaltensweisen wie Zentralreduktion [EHRENSPIEL 2004 S. 130, DÖRNER 2004 S. 308]. Eine Teilproblemzerlegung und -bearbeitung kann beispielsweise zu Fehlern führen, dass erforderliche Randbedingungen nicht beachtet und Einzellösungen nicht zusammenpassen und Vernetzung nicht mehr überschaubar sind [VESTER 2000, S. 47/48] Vorgehensmodelle und Methoden lassen einen Verzicht auf bewusstes und fehlervermeidend kritisches Denken für ein Handeln nicht zu. Sie können diesbezüglich natürlich nicht alle und für jede Situation relevanten Schritte und Handlungen beschreiben, liegt es doch in ihrer Natur, eine gewisse Allgemeingültigkeit zu postulieren, die eine abstrahierte Form der Beschreibung voraussetzt. Reale Problemlöseprozesse sind weitaus vielschichtiger und erfordern (auch innerhalb der einzelnen Schritte in Vorgehensmodellen) die Durchführung zahlreicher mit unterschiedlichen Intentionen gebildeter, an verschiedene Situationen angepasster Handlungen. Daraus ergeben sich nicht geklärte Fragen, etwa unter welchen Randbedingungen oder in welcher Situation, bei welchen Personenmerkmalen und für welchen jeweiligen Problemzustand bestimmte Vorgehensweisen erfolgreich sind. Umso wichtiger ist daher das überlegte Herangehen an die Problemstellungen und die Wahl sowie die Ausführung eines methodischen Vorgehens. Dieser „Common Sense“ ist zur Fehlervermeidung bei jeder Handlung, die auf Regeln basiert, zu einem gewissen Grad vorauszusetzen. In der Produktentwicklung spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle, die das Denken und Handeln von Menschen beeinflussen und dadurch eine Adaption des Vorgehens fordern. Selbst Forschungen zur situativen Kombination von Methoden

und deren Bausteinen [z. B. ZANKER 1999, HUTTERER 2004] haben hier ein Defizit und stellen diesbezüglich hohe Anforderungen an den Methodenanwender. Methodenbeschreibungen bieten in der Regel nur ein basales prozedurales „Wissen“ zur Anwendung dieser Methode. Übertragen auf das Steuern eines Autos bieten Methodenbeschreibungen nur die Pflichtstunden zum Erhalt des Führerscheins. Um Unfälle zu vermeiden und richtiges Verhalten in kritischen Situationen, wie einem ausbrechenden Fahrzeugheck, Glatteis oder Aquaplaning zu trainieren, ist ein Fahrsicherheitstraining mehr als anzuraten. Für Methoden bedeutet das deren praktisches Anwenden in risikoarmer Umgebung. In einer mehrjährigen Betreuung des am Lehrstuhl für Produktentwicklung durchgeführten Praktikums Entwicklungsmethoden konnte die Bedeutung der praktischen Vertiefung theoretisch vermittelter Inhalte bezüglich der Vermittlung eines Fehlerbewusstseins sowie eines fehlervermeidenden realitätsnahen Methodenverständnisses ausnahmslos festgestellt werden. Das auf diese Weise aufgebaute prozedurale Wissen dient auch bei neuen nur theoretisch erlernten Methoden einer kritischeren und fehlerärmeren Anwendung. Für die Methodenlehre bedeutet das, dass die Beschreibung kritischer Stellen eines methodischen Vorgehens, zumindest in Form möglicher Schwierigkeiten in der Anwendung, zur Vermeidung typischer Denk- und Handlungsfehler einen großen Fortschritt bedeuten würde.

## 2.9 Zusammenfassung

Fehler in Produktentwicklungsprozessen, die durch inhaltliche Wissensmängel entstehen, können meist nicht einfach durch allgemeine Problemlösekompetenz beseitigt werden. Methodisches Vorgehen kann nur einen Weg für ein zweckmäßiges Vorgehen aufzeigen [EHRLENSPIEL 2003, S.46]. Für ein erfolgreiches Handeln durch methodisches Vorgehen müssen dessen Defizite bewusst sein. Dazu wurde in diesem Kapitel der Prozess der Produktentwicklung näher betrachtet und seine Bedeutung im gesamten Produktlebenslauf herausgestellt. Es wurde deutlich gemacht, dass der Produktentwickler eine zentrale Rolle bei der Festlegung der Produkteigenschaften innehat. Durch stetige Erhöhung des Kosten- und Zeitdrucks steigen die Anforderungen, qualitativ hochwertige Arbeit zu leisten und erfolgreiche Produkte zu entwickeln.

Dabei begegnen dem Entwickler im Rahmen seiner Tätigkeit so häufig Probleme, dass das Problemlösen als Normalzustand und damit der Produktentwicklungsprozess auch als ständiger Problemlöseprozess zu verstehen ist. Zur Beschreibung dieser technischen Probleme eignet sich die Einteilung [DÖRNER 1987 S. 14] in die vier Problemtypen Interpolations-, Synthese-, dialektisches Problem und das Problem als Kombination aus dialektischem und Syntheseproblem. Die jeweilige Zuordnung zu diesen Typen bilden die Kriterien Bekanntheit des Ziels und Bekanntheit der Mittel in ihrer jeweiligen Ausprägung. Für die Beschreibung der

Schwierigkeit von Problemen eignen sich die Betrachtung der Objekt- und Zielmerkmale beziehungsweise die Merkmale komplexer Handlungssituationen mit den Parametern Anzahl, Vernetztheit, Intransparenz und Dynamik sowie der Zeitdruck und die Politelie<sup>1</sup> als weitere Kriterien.

Zur Lösung von Problemen wenden Menschen seit jeher natürliche Verhaltensweisen an, die sie im Laufe der Evolution zu Heuristiken herausgebildet haben. Auch wenn viele dieser Heuristiken aus einer Zeit stammen, die mit der heutigen nicht mehr unbedingt vergleichbar ist, so können sie dennoch bei vielen Problemstellungen der heutigen Zeit ein erfolgreiches Vorgehen implementieren und so die Suche nach der richtigen Lösung unterstützen. Da Menschen, wie jedes biologische System, versuchen, mit höchstmöglicher Effizienz vorzugehen, werden Handlungsstrategien, wie das Similarity Matching oder das Frequency Gambling angewendet, um mittels bekannter und bisher erfolgreicher Problemlösung neuartige Problemzustände zu lösen. Dabei wird das Problemlösen üblicherweise über überwiegend bewusstes und dialektisches Denken durchgeführt.

Dennoch kann es dabei zu Denk- und Handlungsfehlern kommen. Diese treten als Fehldeuten, Fehlschließen, Fehlentscheiden oder Fehlplänen auf und lassen sich einer regel- und wissensbasierten Ebene zuordnen. Diese Fehler führen schließlich zu falschen Entscheidungen.

Fehlerursachen sind Verhaltensweisen, die häufig auf einem Mangel an der richtigen Information basieren. Zum Verständnis dieser Problematik wurde ein Modell der Informationsbausteine und Wissenslücken entwickelt. In diesem Modell wird durch das Zusammensetzen von einzelnen Bausteinen aus Information ein Wissensbauwerk zur Lösung eines Problems und schließlich zur Generierung eines Produkts errichtet. Fehlen Informationen, so ergeben sich im Bauwerk Wissenslücken. Für diese Lücken muss der passende Informationsbaustein gefunden werden. Bleibt die Lücke bestehen, weil eine Information nicht beschafft werden kann, so kann das Bauwerk nicht erstellt und das Problem nicht gelöst werden. Wird der falsche Baustein verwendet, die Lücke nicht erkannt und auf einer Lücke weitergebaut, so führt das zu einer „scheinbaren Belastbarkeit“ einer tragenden Mauer, was schließlich zu einem Einsturz des ganzen Gebildes führen kann. Auch die Erstellung eines nicht dem Ziel entsprechenden Gebäudes ist so möglich. Die Schwierigkeit beim Problemlösen stellt das Erkennen einer Wissenslücke, die zweckmäßige Suche und das Finden der geeigneten Informationsbausteine, die Adaption und das Einsetzen der gefundenen Information in die bestehende Lücke. Das Ergebnis ist dann schließlich noch kritisch zu hinterfragen.

Es existieren zahlreiche methodische Anleitungen in Form von Vorgehensmodellen oder Methoden. Diese zeigen mehr oder weniger hinsichtlich einer Allgemeingültigkeit abstrahiert oder hinsichtlich der erfolgreichen Durchführung einer spezifischen Problemstellung und Si-

---

<sup>1</sup> Das Vorhandensein mehrerer (oft unklarer) Ziele.

tuation konkretisiert, einen Weg, um fehlende Informationsbausteine zu finden und so schließlich Wissenslücken zu schließen. Diese methodischen Vorgehensweisen stellen eine Form von prozeduralem Wissen dar, mit dessen Hilfe man deklaratives Wissen erzeugen kann. Häufig wird eine Methode oder ein Vorgehensmodell fälschlicherweise als Garant gesehen, dieses Faktenwissen zu erhalten. Sie bieten zwar die Chance dazu, jedoch sind Problemstellungen so unterschiedlich und die Situationen so vielfältig, dass sie den Anwender nicht zwangsläufig zu der gesuchten Information führen können. Zusätzlich kann methodisches Vorgehen selbst zu Fehlern führen, wenn etwa die Erfahrung in der Anwendung einer Methode fehlt. Damit bleibt das Problemlösen vor allem in Produktentwicklungsprozessen ein auf Denkvorgängen basiertes risikobehaftetes und fehlerträchtiges Handeln. Hieraus ergibt sich schließlich die Forderung an Methodenentwickler und -vermittler, neben der Beschreibung von Methoden dem Anwender eine Beschreibung möglicher Fehler, fehlerverursachender Parameter und Schwierigkeiten, die bei der Anwendung von Methoden auftreten können, zur Verfügung zu stellen.

Methoden und Vorgehensmodelle unterstützen das Handeln aber nicht unbedingt die Denkprozesse im Hintergrund [EHRENSPIEL 2003 S. 67], dadurch kann es trotz bewusstem Handeln in der Annahme, die richtigen Schlüsse und Entscheidungen getroffen zu haben, zu den beschriebenen Fehlern im klassischen Sinne kommen. Fehlervermeidung findet nicht durch Ausführen von Handlungsanweisungen, wie sie bestimmte Entwicklungsmethoden vorschlagen [RUTZ, 1985 S. 46] statt, sondern durch ein entsprechendes Bewusstsein für Denk- und Handlungsvorgänge beim Entwickler selbst. Fehlervermeidendes Entwickeln bedeutet die Kenntnis über fehlerfördernde Parameter, wie beschränkte menschliche Ressourcen und Verhaltensweisen sowie vorhandene und benötigte Informations- und Wissenszustände bezüglich deklarativen und prozeduralen Wissens.



### **3 Ansatz zur Fehlervermeidung bei der Arbeit mit Methoden**

Wie ist nun eine Methodenentwicklung und ihr Einsatz unter den in dieser Arbeit thematisierten Erkenntnissen zu unterstützen? Eine Kernaussage in dieser Arbeit ist, dass Fehler im Denken und Handeln von Entwicklern durch einen Wissensmangel in entscheidendem Maße verursacht werden können. Das bedeutet, dass das Vorhandensein oder nicht Vorhandensein von Information die Güte und damit die Richtigkeit einer Handlung stark beeinflusst. Information ist damit nicht nur für die Lösung für ein Problem entscheidend, sondern auch für die Handlung zur Problemlösung. Auch methodisches Handeln benötigt die richtige Information.

In der Vermittlung von Methoden, der Lehre und dem Methodentransfer in die Industrie, lässt sich immer wieder beobachten, dass Entwickler Probleme mit der Anwendung von Methoden haben. Obwohl diese zur Lösung von Problemen in Entwicklungsprozessen eingesetzt werden sollen und dabei den Entwickler primär unterstützen und nicht behindern sollen. Die Ursache für dieses Dilemma kann in der Methode liegen, genauer in ihrer Erstellung und Beschreibung, aber auch am Anwender, dem Entwickler, der mit dieser Methode eine Barriere im Prozess umgehen möchte.

Im ersten Fall besteht die Möglichkeit, dass Methoden bestimmte Randbedingungen eines Einsatzes nicht berücksichtigen oder kritische Stellen beinhalten und somit gegebenenfalls nicht ausreichend zur Lösung eines Problems sind. Methoden müssen beispielsweise einen gewissen Grad der Abstraktion besitzen. Sie fordern für sich zwar üblicherweise nicht eine allgemeine Gültigkeit, sollen aber grundsätzlich in verschiedenen, zwar ähnlichen aber graduell spezifischen Problemstellungen Unterstützung leisten. Dadurch können sie allerdings nicht mehr dem Anspruch gerecht werden, immer für eine fehlerfreie Anwendung zu garantieren. Problematisch wird dies allerdings dann, wenn dem Entwickler bei einem Einsatz potenzielle Risiken einer fehlerhaften Anwendung nicht bekannt sind. Üblicherweise finden sich bei Methodenbeschreibungen keine Hinweise zu diesen Risiken und zur Vermeidung möglicher Fehler bei einem Methodeneinsatz.

Liegt die Ursache einer fehlerhaften Handhabung einer Methode beim Entwickler, so kommen verschiedene Möglichkeiten als Ursachen in Betracht. Methoden fordern im Regelfall ein entsprechendes (Methoden-)Wissen über die einzelnen Schritte ihres Einsatzes. Neben der theoretischen Vermittlung dieses Wissens ist ein Erfahrungsaufbau durch die Anwendung von Methoden bedeutsam, da etwa aufgrund mangelnder Methodenbeschreibung nur über die Anwendung selbst Risiken erkannt und Handlungsoptionen erarbeitet werden. Dabei ist sowohl die wiederholte Anwendung einer Methode, als auch die Anwendung verschiedener Methoden anzuraten. Ein falscher Methodeneinsatz ist schließlich auch möglich, wenn dies-

bezüglich Denk- und Handlungsfehler zu falschen Interpretationen, unsinnigen Adaptionen oder falschen Ausführungen von Methoden führen.

Dieser Argumentation folgend ergeben sich Anforderungen für die drei wesentlichen Bereiche, der Erstellung, der Vermittlung sowie dem Einsatz von Methoden, wenn ein Anspruch an eine geringe Versagenshöhe gefordert ist. Die Generierung von Methoden stellt die Grundlage einer erfolgreich anwendbaren Methode dar. Dabei sind mögliche Handlungs- oder Denkfehler als provozierende kritische Stellen vorauszusehen und durch geeignete Methodenbestandteile zu vermeiden. Der zweite wesentliche Bereich behandelt die Vermittlung von Methoden. In vielen Beschreibungen von Methoden und deren Anwendung finden sich wesentliche Schritte beschrieben. Oft fehlt jedoch die Angabe kritischer Stellen bei einer Methodenanwendung. Doch gerade das Wissen über diese Stellen im Prozess der Methode führt zu weniger Fehlern bei einem Einsatz, weniger Iterationen und schließlich zu einer höheren Quote guter Lösungen für Probleme. Die Beobachtung einer Studentengruppe bei der praktischen Anwendung unterschiedlicher Methoden [SCHUSTER 2006] bestätigte diese Vermutung, die sich bei einer über dreijährigen Studie mehrerer Studentengruppen ergab. Über eine ausführlichere und fehlerbewusste Beschreibung und Vermittlung ließen sich teilweise begründete Vorurteile, wie etwa ein geringer Wirkungsgrad einer Methode, abbauen und die Akzeptanz bezüglich methodischen Vorgehens zur Problemlösung steigern. Eine weitere Anforderung ist die kritische Betrachtung der eigenen Denk- und Handlungsvorgänge im Einsatz. Sie stellt die sicherlich stärkste Möglichkeit dar, Fehler im Methodeneinsatz zu vermeiden beziehungsweise frühzeitig zu erkennen, falls ein methodisches Hilfsmittel nicht ohne kritische Stellen erstellt und diese in einer Methodenbeschreibung nicht berücksichtigt werden konnten. Diese Reflexion sollte dabei einzeln oder, wenn möglich im Team [WULF 2001] durchgeführt werden, um Fehler zu erkennen und schließlich zu vermeiden. Die Reflexion von Handlungen findet sich allgemein als geforderte Handlung bei der Anwendung von Vorgehensmodellen [HUTTERER 2005 S. 77] oder als explizit angesprochene Phase in Vorgehensmodellen, wie ARIZ [ALTSCHULLER 1986] oder dem Münchener Vorgehensmodell mit dem Element Ziel absichern [LINDEMANN 2005]. Als Element einer Methode wird sie nur in wenigen Methoden vorgeschlagen, wie zum Beispiel eine Sensitivitätsanalyse oder Plausibilitätsprüfung nach einer Bewertung. Bemerkenswert ist jedoch, dass der Einsatz hier nur in dem Fall empfohlen wird, wenn ein Ergebnis stark von einer Erwartung abweicht. Bestätigt hier ein Ergebnis eine schon falsche Erwartung, so wird trotz falschem Ergebnis wahrscheinlich keine Reflexion erfolgen. Die Folgen einer solchen nicht erkannten falschen Entscheidung können schwerwiegend sein.

Gerade bei der Anwendung von Methoden, bei denen einzelne und sehr konkrete Handlungsschritte vorgegeben werden, kann durch Reflexion bewusstes und fehlerreduzierendes Handeln unterstützt werden. Dies gilt für einzelne Schritte der Methode ebenso, wie für die Interpretation oder Adaption einzelner Methodenbausteine für eine vorliegende Situation.

Für die Methodenentwicklung, -vermittlung und -anwendung sollten also drei grundsätzliche Aussagen für die jeweiligen Handlungen bindend sein:

- Bei der Entwicklung von Methoden ist darauf zu achten, dass kritische Stellen, die in der Anwendung zu Fehlern in Denk- und Handlungsprozessen führen können, zu vermeiden sind.
- Bei der Vermittlung von Methoden und deren Einsatz sollten kritische Stellen ein wesentlicher Punkt sein. Durch die Sensibilisierung der Anwender für das vorhandene Fehlerpotenzial wird eine Voraussetzung für richtig angewandte Methoden geschaffen.
- Bei dem Einsatz von Methoden ist grundsätzlich eine Reflexion nach den einzelnen Handlungs- oder Ergebnisschritten zu empfehlen. Fehler durch Fehldeuten, -schließen, -entscheiden und -handeln können so frühzeitig erkannt und angegangen werden.



## 4 Analyse biologischer Phänomene und Effekte und deren Umsetzung in technische Systeme

*Methodisch unterstütztes Problemlösen in Produktentwicklungsprozessen wird durchgeführt, um Probleme effektiv zu lösen. Bei der Verwendung von Methoden kommt es aus den beschriebenen Gründen immer wieder zu Fehlern. Dabei ist die Fehleranfälligkeit bei der Anwendung bestimmter Methoden stärker ausgeprägt als bei anderen. Eine Methode mit einem solchen hohen Fehlerpotenzial stellt die Bionik in adäquater Weise dar. Sie lässt trotz großer Popularität bei Anwendern und nachweislich überragender Leistung zur Innovation ein außerordentlich hohes Fehlerpotenzial in den einzelnen Schritten zu. Als Methode zum Problemlösen in der Produktentwicklung steckt sie eigentlich noch in ihren Kinderschuhen und dient vorrangig als spektakuläre und medienwirksame, vor allem aber nachträgliche Begründung für technische Innovationen, denen aufgrund des Nimbus des Natürlich-biologischen oft unbegründet noch eine ökologische Bedeutung zugesprochen wird.*

*In diesem Kapitel wird die Bionik zuerst in ihrer derzeitigen Anwendung betrachtet. Gründe für die vorhandenen Schwierigkeiten bei der Analyse und Übertragung der Effekte biologischer Phänomene in technische Systeme werden durch den Vergleich technischer und natürlicher Systeme eruiert. Ansätze zur Verwendung der Bionik als Methode zur Lösung technischer Probleme werden untersucht und in hier vorgestellten Fallbeispielen überprüft. Von zentraler Bedeutung ist in diesem Kapitel die über eine Stichprobe in verschiedenen Unternehmen ableitbare Fragestellung, warum die Bionik, trotz positiver Bewertung zu selten in einer erfolgreichen Problemlösung mündet. Diese Fragestellung wird vor allem unter den in den vorigen Kapiteln behandelten, zentralen Faktoren „Wissen“, „Information“ und „Fehler beim Denken und Handeln“ diskutiert.*

### 4.1 Bionik

Die Entwicklung der Beobachtung der Natur zur Lösung technischer Probleme ist nachweislich keine moderne Erscheinung. Schon Experimente von Verhaltensforschern bestätigen bei höher entwickelten Lebewesen die grundsätzliche Fähigkeit zur Problemlösung über die Beobachtung und Anwenden nichteigenen Vorgehens [DE BEAUNE 2004, RIOPELLE, A. J. 1967]. Auch als Methode ist dieses Vorgehen für Menschen nicht neu, sondern eine deutlich ältere Vorgehensweise, deren Prinzip zumindest laut Originaldokumenten etwa schon Leonardo da Vinci im 15. Jahrhundert anwendete. Es lässt sich durchaus feststellen, dass in einer weniger technisch fokussierten Zeit die Beobachtung natürlicher Systeme intensiver angewendet wurde, hatte man doch weniger physikalisch-technisches Wissen, um Problemstellungen techni-

scher Art zu lösen, als heute. Doch gerade die Beobachtung und Analyse natürlicher Phänomene kombiniert mit diesem modernen Wissen bietet in dieser Kombination mehr Potenzial als je zuvor.

Betrachtet man jedoch die Bionik in ihrer eigentlichen Intention und ihre Entwicklung als Methode bis hin zu ihrem heutigen Stand, so beschleicht den kritischen Leser bionischer Literatur manchmal durchaus berechtigt der Eindruck, sie wäre von ihrem ursprünglichen Weg abgekommen und hätte eine Entwicklung „an ihren Zielen vorbei“ erfahren. So finden sich bei einer Recherche über Bionik überwiegend Hochglanz-Bildbände, die eindrucksvoll bionisch-technische Anwendungen und ihren biologischen Ursprung beschreiben. Dieser Glanz vergeht jedoch, wenn sich bereits im zweiten Buch die beschriebenen Lösungen wiederholen. Man bekommt das Gefühl, die Biologie besitzt entweder doch nicht so großes technisch anwendbares Potenzial und lässt sich daher nicht so oft in technische Systeme übertragen oder es mangelt an methodischer Unterstützung zur erfolgreichen Suche und Umsetzung biologischer Phänomene in technische Systeme.

Der Begriff Bionik wurde wahrscheinlich von dem Luftwaffenmajor J. E. Steele als Kunstwort aus Biologie und Technik kreiert [NACHTIGALL 1997 S. 1]. Nachtigall definiert Bionik als „das Lernen von der Natur als Anregung für eigenständiges technisches Gestalten“. Eine allgemeinere Definition für die Bionik aus wissenschaftlicher Sicht ist die „systematische technische Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme“ [NEUMANN 1993 S. VIII]. Dies bedeutet deren bewusstes Suchen, Analysieren und die technische Umsetzung. Häufig werden hierbei aber auch Assoziationen zur Bionik mitgezählt, wenn biologische Phänomene ohne Analyse über eine gedankliche Verknüpfung zu technischen Lösungen mit einem nicht biologischen Ursprung führen. Diese Art der Lösungsfindung weist streng genommen synektischen Charakter auf. Durch eine schärfere Abgrenzung ließe sich ein eindeutigeres methodisches Vorgehen der Bionik vermitteln und sicherlich der Eindruck der Zufälligkeit der Lösungsfindung vermeiden. Synektisches Vorgehen sollte daher nicht als Bionik umschrieben werden, auch wenn unterschiedliche Fachgebiete eine jeweils zweckmäßig differierende Sichtweise auf die Bionik besitzen.

Betrachtet man die aktuelle Bionikforschung und ihre Netzwerke, so liegt der Schwerpunkt stärker auf Seiten der Biologie. Die Teilgebiete der Bionik werden üblicherweise in die Bereiche Struktur-, Funktions-, Organisations-, Verhaltens-, Paläo- und Evolutionsbionik unterteilt [HILL 1997 S. 52]. Technische Fachrichtungen befassen sich mit der Biologie überwiegend im Fokus einer Grundlagenforschung (z. B. Materialforschung).

Über die Disziplin der technischen Biologie werden natürliche Phänomene erforscht und allgemein analysiert, bevor sich in Abstimmung mit technisch geprägten Disziplinen Gedanken über eine mögliche Anwendung analysierter interessanter biologischer Effekte gemacht wer-

den. Es werden also technische Probleme zu vorhandenen „Lösungen“ gesucht. Dies klingt mehr als paradox und ist nicht wirklich effizient. Gerade weil die Natur ein derart breites potenzielles Lösungsspektrum für technische Fragestellungen aufweist, mutet der Erfolg einer allgemeinen Analyse und vor allem deren Anwendung bei technischen Problemstellungen zumindest zurzeit noch nicht sinnvoll an. Die Erstellung eines oft unterschiedlich bezeichneten biologischen Effekt-Katalogs, wie es ihn für physikalische Effekte bereits in verschiedensten Formen gibt (etwa dem Programm TechOptimizer® der Firma Invention Machine), wird von verschiedenen Seiten zwar in Angriff genommen [HILL 1997, ZERBST 1987], leistet bisher aber aus dem gleichen Grund nur rudimentäre Hilfe. Durchforstet man Veröffentlichungen zur Bionik, scheinen seit Jahren die gleichen Beispiele zur Bestätigung des Erfolgs der Bionik herangezogen zu werden [NACHTIGALL 1998, BLÜCHEL 2004A, BLÜCHEL 2004B]. Hierzu sei noch zu erwähnen, dass die Bionik ein gewisser Trend auszeichnet. Trotzdem kann dem Produktentwickler eine biologisch basierte spezifische Lösung für sein definitiv spezifisches Problem bisher nur in den seltensten Fällen geboten werden. Da mittels bekannten Phänomenen Haifischhaut, Eisbärenfell oder Lotuseffekt und ihren Effekten die wenigsten technischen Probleme, welche sich in den vielen Unternehmen täglich zeigen, in Angriff genommen werden können, kann hier eine effiziente Unterstützung derzeit nur in Form eines Vorgehens und entsprechenden Methoden existieren. Bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, dass im Bereich der Methodenforschung kaum verstärkte Aktivität festzustellen ist. Dem Entwickler muss ein Weg gezeigt werden, zielgerichtet geeignete Phänomene in der Natur zu finden, effizient zu analysieren und effektiv technisch umzusetzen. Betrachtet man jedoch die Schwierigkeiten in diesem Vorgehen, so zeigt sich gerade auf dieser Ebene hoher Bedarf der Optimierung. Das derzeit in der allgemeinen Bionikforschung verfolgte Ziel einer Effektsammlung ist in seiner zukünftigen Form für einen Entwickler sicherlich ein unterstützendes Hilfsmittel, sie kann derzeit und mittelfristig die an ein erfolgreiches Vorgehen gestellten Anforderungen nur in sehr begrenztem Maße erfüllen. Dies konnte in den am Lehrstuhl für Produktentwicklung durchgeführten Fallstudien festgestellt werden.

Die Lösungssuche im Bereich der Natur zählt für technisch geprägte Personen in ihrem Umfeld sicherlich zu einem atypischen Vorgehen. Es wird üblicherweise nur durchgeführt, wenn gewohnte Vorgehensweisen, wie etwa die Suche nach technischen Standardlösungen oder Benchmark oder Ähnliches bereits angewendet wurden und nicht zu einem gewünschten Erfolg geführt haben oder besonders neuartige und innovative Lösungen gefunden werden sollen, die sich von Bestehendem abheben sollen. In jedem Fall ist die in der Industrie zur Verfügung stehende Zeit meist gering [BIRKHOFER 2004] und der Erfolgsdruck besonders hoch. Deshalb ist Effektivität und Effizienz im Vorgehen auch bei dieser Methode gefordert.

## 4.2 Problemlösung mittels Bionik

Möchte ein Entwickler innerhalb eines Produktentwicklungsprozesses eine Lösung für ein technisches Problem erarbeiten, die über die Suche in der Natur inspiriert werden soll, so unterscheidet sich dieses Vorgehen von einer klassischen Lösungssuche.

In beiden Fällen trifft der Entwickler während der Bearbeitung eines Produktentwicklungsprozesses auf eine Barriere, in der er die routinemäßige Bearbeitung abbrechen und das sich darstellende Problem bewusst bearbeiten muss. Würde dieser Entwickler mittels klassischer Vorgehensweise dieses Problem (P) erfolgreich bearbeiten wollen, so würde er wahrscheinlich eine Abstraktion des Problems in Form einer Systemmodellierung über Funktionen durchführen, um ein Problemmodell und Systemverständnis aufzubauen. Für die Funktionen, die allein oder Kombination ein abstraktes Problem (P') darstellen, würden auf dieser abstrakten Ebene eine prinzipielle Lösung (L') in Form von physikalischen Effekten gesucht und über wenige Schritte auf eine Lösung (L) des vorliegenden Problems konkretisiert. Die auf physikalischen Effekten beruhende prinzipielle Lösung ist für den Entwickler üblicherweise relativ einfach zu erstellen.

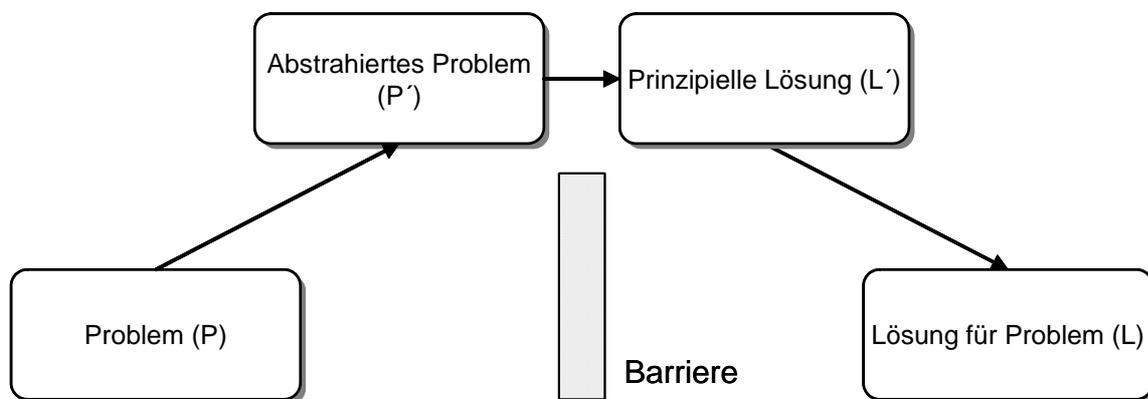


Abb. 4-1: Typisches Vorgehen bei der technischen Problembearbeitung

Betrachtet man auf diese Art das Vorgehen der Suche nach Lösungen für technische Probleme über die Natur, so unterscheidet es sich dahingehend, dass weitere Schritte notwendig sind. Nachvollziehbarerweise beginnt der Entwickler ebenfalls über die Abstraktion einer Funktionsmodellierung und der Beschreibung dieser Funktionen üblicherweise mittels Substantiv und Verb. Über eine Funktion müssen nun biologische Phänomene gefunden werden. Dies ist durch Kataloge verschiedener Autoren mit allerdings unterschiedlicher Intention unterstützt [HILL 1997, GRAMANN 2004] und soll für die Zukunft durchaus in Form internetbasierter und weitaus vollständigerer Datenbanken dargestellt werden. Die den gefundenen Phänomenen

zugrunde liegenden Effekte biologischer Systeme müssen im Gegensatz zu einem rein technischen Vorgehen erst aufwendig analysiert werden, bevor sie bewertet und ausgewählt werden können, um schließlich bestenfalls über eine prinzipielle Lösung auf das vorliegende technische Problem übertragen zu werden. Auch existiert üblicherweise kaum Information über die Voraussetzungen und Bedingungen für die erfolgreiche Wirkung eines biologischen Effekts. Hierfür lassen sich in der Literatur kaum für die Anwendung der Bionik optimierte Hilfsmittel finden. Darüber hinaus ist der Entwickler üblicherweise mit einem nicht mehr als rudimentären biologischen Wissen ausgestattet, welches meist noch in der Schulzeit vermittelt worden ist. Dieser Nachteil lässt sich nur bis zu einem gewissen Grad durch allgemeines technisches Verständnis und ein analytisches Verständnis ausgleichen. Information über die biologischen Phänomene und über deren Wirkweise scheint den Schlüssel zu einer erfolgreichen und fehlerfreien technischen Umsetzung zu sein. Nicht nur rein technisch ausgebildeten Menschen fehlt bei der Anwendung einer Bionik zur Problemlösung oft die notwendige Information, um eine ausreichende Modellbildung durchführen zu können. Bei den abgeleiteten prinzipiellen Lösungen können entscheidende Randbedingungen unberücksichtigt bleiben. Fehler und damit das Scheitern dieser Methode sind damit vorprogrammiert.

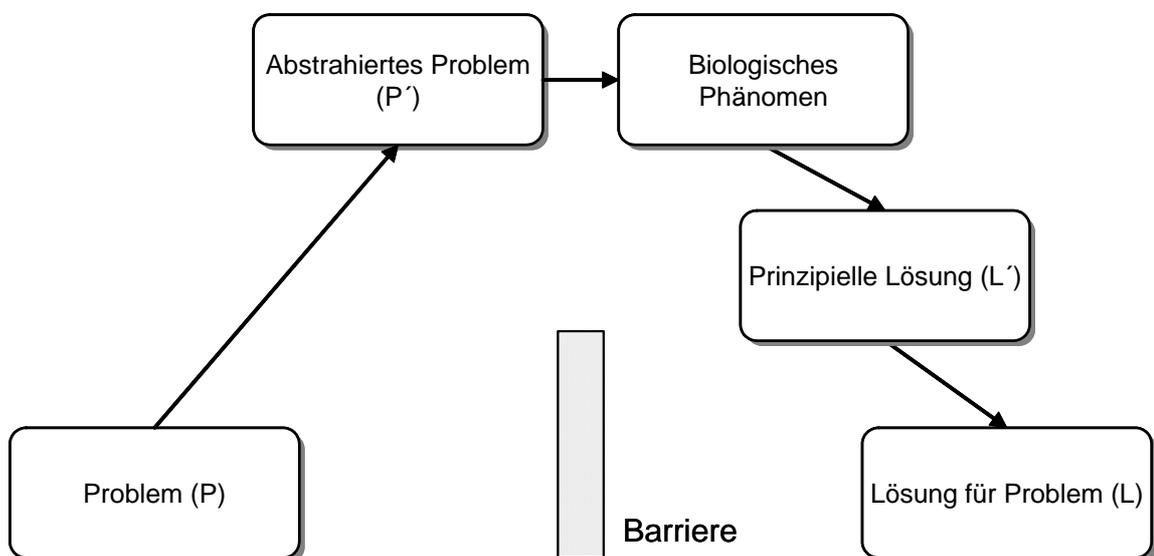


Abb. 4-2: Vorgehen bei der Suche nach Lösungen über die Natur

Das Vorgehen der Lösungssuche mit Hilfe der Biologie beinhaltet also zusätzliche Schritte, die Interpretationen und Entscheidungen erfordern. Dadurch ergeben sich für viele Anwender weitere Problemstellungen, die wiederum Fehler möglich machen. Folgen, wie ein Zeitverlust und nicht optimale Lösungen sind nicht nur in den Situationen, in denen eine Lösungssuche mit Hilfe der Biologie im industriellen Umfeld üblicherweise durchgeführt werden könnte,

mehr als unerwünscht. Um das Vorgehen zu unterstützen, wurden Vorgehensmodelle entwickelt, die die Effektivität der Anwendung einer Bionik unterstützen sollen. Aufgrund ihrer Verbreitung und dem entsprechenden Bekanntheitsgrad haben sich zwei Modelle etabliert, die ihre Wurzeln in der Biologie haben und sequenzielle Aktionen rund um einen biologischen Lösungskatalog [HILL 1997] bzw. einer Sammlung biologischer Prinzipien [ZERBST 1987] vorgeben. Hill fordert ein Vorgehen der Abstraktion. Über eine Blackbox Betrachtung wird ein biologisches System auf eine (Haupt-)Funktion reduziert und anschließend hinsichtlich seiner Strukturen und Funktionen prinzipiell analysiert und schließlich technisch übertragen [HILL 1997 S. 58]. Hill spricht dabei von einer „systemanalysierende(n) Blackbox-Methode und Modellmethode“ innerhalb eines „bionischen Denk- und Handlungsprozess“ [HILL 2005 S. 316]. Dieses Vorgehen leistet auf sehr abstrakter Ebene eine „grobe Orientierung“. Ergänzt wird dieses Modell durch das „Strategiemodell zur Zielbestimmung und Lösungsfindung in bionisch orientierten Entwicklungsprozessen“ nach Linde und Hill [LINDE ET AL. 1993 S. 155]. Zerbst schlägt eine algorithmische Suchstrategie vor, die Ähnlichkeiten zwischen Funktionen, Randbedingungen und Gütekriterien abfragt.

Schwierigkeiten bei der Anwendung dieser beiden Modelle liegen in ihrer naturwissenschaftlichen Herkunft begründet und gestatten so nur begrenzt eine Verwendung für reale technische Problemstellungen.

#### **4.2.1 Modellierung des bionischen Vorgehens für technische Problemstellungen**

Auf Seiten der Entwicklungsmethodikforschung innerhalb der Ingenieurwissenschaften wurde auf der Basis des Münchener Vorgehensmodells ein Bionisches Vorgehensmodell [GRAMANN 2004 S. 98] entwickelt, welches Entwickler in der Industrie in Problemlöseprozessen unterstützen soll und damit einen Beitrag zur Anwendbarkeit einer Methode Bionik in der Praxis leistet. Damit geht es noch über die Gedanken der Angewandten Bionik [ZERBST 1987 S. 18] hinaus. Es bedient und unterstützt die Aufgabe, aus einer meist konstruktiv geprägten Problemstellung heraus Lösungen über biologische Vorbilder zu suchen und technisch umzusetzen. Neben vier Handlungsschritten beinhaltet es weiterhin drei oft notwendige Entscheidungsschritte, die entweder Iterationen implementieren oder die Durchführung der Methode beschließen. Die Schritte selbst sind relativ abstrakt formuliert, sodass nicht alle Einzelhandlungen beschrieben werden, die in den jeweiligen Schritten auszuführen sind. Innerhalb der Schritte können und müssen mitunter weitere Methoden, Teile oder Abfolgen von Methoden ausgeführt werden.

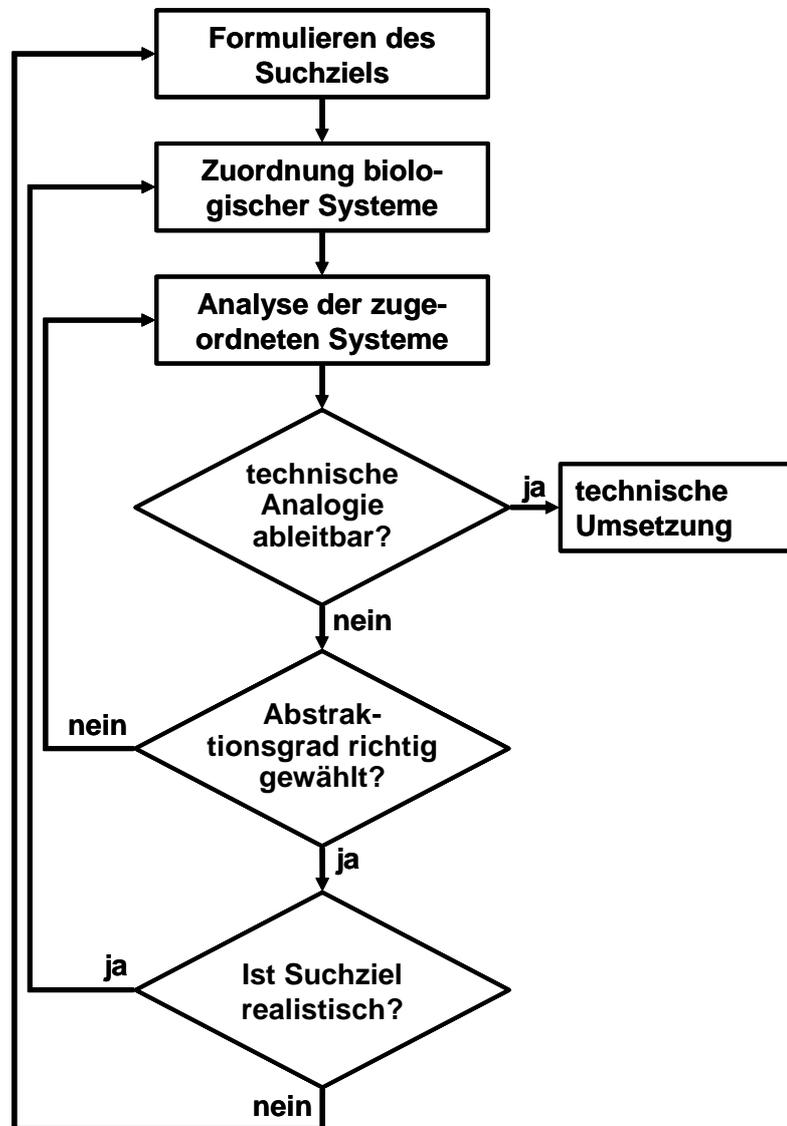


Abb. 4-3: Bionisches Vorgehensmodell [GRAMANN S. 98]

Die Verbindung zur Problemstellung wird in der „Formulierung des Suchziels“ ermöglicht. Die hier ausgeführten Handlungen sind methodisch geschulten Ingenieuren nicht fremd und dennoch für den einen oder anderen nicht ohne weitere Probleme zu bearbeiten. Die Einleitung weiterer Schritte wird entweder über eine Funktionsmodellierung oder die Beschreibung erforderlicher Randbedingungen in Form einer physikalischen Problemmodellierung implementiert. In beiden Fällen ermöglicht eine lösungsneutrale und abstrakte Formulierung in nachfolgenden Phasen ein breiteres Feld potenzieller Lösungen basierend auf biologischen Phänomenen.

Auch die „Zuordnung biologischer Systeme“ als zweiter Schritt ist in ihrem Ablauf dem Methodiker bekannt, wenn diese in Form eines Brainstormings beispielsweise in einer Gruppe oder über eine Literaturrecherche in biologischen Standardwerken oder dem Internet abläuft. Kritisch ist hier auch wieder das Finden geeigneter Information, um das für eine Problemlösung notwendige deklarative Wissen aufzubauen. Hierzu wurde eine Liste entwickelt, die über 177 technische Funktionen nicht einzelne rudimentär beschriebene Phänomene bietet, sondern mit Hilfe geeigneter Suchbegriffe den „Zugang zu biologischen Lösungsfeldern ermöglicht“ [GRAMANN 2004 S. 109]. Diese sind überwiegend mit ihren wissenschaftlich korrekten Bezeichnungen versehen, um bei der Recherche in Internet und Literatur das Auffinden fundierter Fachbeiträge zu erleichtern und so relevante Informationen schnell und sicher zu erhalten. Diese Liste geht somit über bestehende Ansätze hinaus, die den technischen Funktionen nur einige wenige biologische Phänomene zuordnen.

Die „Analyse der zugeordneten Systeme“ zur Übertragung eines Effekts zur Lösung eines technischen Problems stellt den dritten Schritt des bionischen Vorgehensmodells dar. Hierbei wird einerseits biologisches Grundwissen, andererseits wiederum die Durchführung von Expertenbefragung, Literatur- und Internetrecherche gefordert. Benötigte aber nicht abfragbare Information ist über Modellbildung, Berechnung und Versuch über hohen Aufwand zu erhalten. Diese Tätigkeit wird auch als Technische Biologie bezeichnet [NACHTIGALL 1997] und stellt eine bereits existierende Sparte des Forschungsumfelds der Bionik dar. In vielen realen Fällen bei der Entwicklung technischer Produkte sind aufwendige Verfahren in einem frühen Stadium weder finanziell noch zeitlich vertretbar, für eine Entscheidung zur technischen Umsetzung müssen qualitative aber möglichst belastbare Aussagen genügen. Hierzu ließen sich trotz umfangreicher Recherche nur wenige Methoden wie der orientierende Versuch finden. Dieses Vorgehen stößt erfahrungsgemäß bei vielen biologischen Effekten an seine Grenzen, wenn die diesem Vorgehen eigenste Forderung nach einem geringen Aufwand bestehen bleiben soll.

Die positive Beantwortung des ersten formulierten Entscheidungsschrittes, der Frage nach der „Ableitung einer technischen Analogie“ mündet in die technische Umsetzung des analysierten biologischen Systems. Spätestens in diesem Schritt sind falsche Hypothesen möglichst frühzeitig zu entdecken, um nicht in späten Phasen die weitere Bearbeitung abbrechen zu müssen und unter erhöhten Zeitdruck nach alternativen Lösungen suchen zu müssen und so eventuell gesetzte Ziele zu verfehlen.

Findet sich trotz genauer Betrachtung biologischer Systeme keine Ableitung einer technischen Analogie, so sind zwei weitere Fragen zu stellen. Zum einen nach der richtigen „Wahl des Abstraktionsgrades“, andererseits nach der realistischen Formulierung des Suchziels. Scheitert eine technische Umsetzung des Systems auf konkretem Niveau, so sind höhere Abstraktionsebenen der Umsetzung anzuraten. An dieser Stelle zeigt sich auch, ob der Abstraktions-

grad der Analyse richtig gewählt war. Ein biologisches Phänomen lässt sich auf verschiedenen Ebenen betrachten und zeigt jeweils eigene Ursachen für einen Effekt bzw. für das Gesamtphänomen. So scheint auf einem ersten Blick die fluiddynamische Spindelform eines Delphinkörpers ausschlaggebend für die hohe Effizienz dieses Tieres bei der Fortbewegung im Wasser. Bei genauerer Betrachtung auf einer konkreteren Ebene lässt sich auch eine Duktilität der Haut feststellen, welche durch eine flüssig-elastische Dämpfungsschicht eine laminare Strömung aufrechterhält und durch Turbulenzen verursachte hohe Reibungswiderstände vermeidet. Dieser Effekt trägt ebenfalls entscheidend auf die Widerstandsarmut eines Delphins im Wasser bei. Beispiele für die Vernetzung mehrerer Effekte auf unterschiedlichen Ebenen finden sich im Bereich der Biologie zuhauf. Dies ist darin begründet, dass sich biologische Systeme evolutionsbedingt immer als Gesamtsystem an die vorherrschenden Randbedingungen anpassen und damit eine Optimierung erreichen. Technische Entwicklungen besitzen meist einen so genannten Flaschenhals, bei dem ein geringer entwickeltes Systemelement die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems einschränkt.

Scheint die Wahl der Abstraktionsebene nicht die Ursache dafür, dass die technische Umsetzung eines biologischen Phänomens nicht möglich scheint, so ist wahrscheinlich das Suchziel nicht realistisch formuliert worden. In diesem Fall empfiehlt Gramann die Formulierung aufzuweiten und auf einer allgemeineren Ebene zu suchen [GRAMANN 2004 S. 104]. Darüber hinaus existiert schließlich die Möglichkeit, dass in der Biologie kein für das technische Problem hilfreiches System existiert.

### 4.2.2 Fallbeispiel

Das bionische Vorgehensmodell wird inzwischen in bionisch geprägten Studienarbeiten, Praktika und in Workshops mit der Industrie mit überwiegend positivem Erfolg angewendet. Die Bearbeiter können sich durch diese Art der Unterstützung trotz eines meist geringen biologischen und bionischen Grundwissens schnell in der speziellen Thematik zurechtfinden und erkennen so die relevanten Schritte bei der Suche nach Lösungen für technische Probleme über biologische Phänomene. Da gerade der Faktor Zeit in der praktischen Anwendung eine entscheidende Rolle spielt, ist dieses Ergebnis überaus bedeutsam.

Dennoch kommt es gerade bei der Ausführung der einzelnen Schritte noch häufig zu Schwierigkeiten, die die Umsetzung und die erfolgreiche Anwendung eines methodisch unterstützten bionischen Vorgehens erschwert. Stellvertretend für eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen sollen anhand des folgenden Fallbeispiels Vorteile und Schwierigkeiten des Bionischen Vorgehensmodells erarbeitet und vorgestellt werden.

In einer konkreten Aufgabe ging es darum, einen Rasenmäher hinsichtlich des Schnittbilds und der Geräuschentwicklung zu optimieren, indem im biologischen Umfeld nach Phänome-

nen gesucht wurde, die die entsprechenden technischen Funktionen biologisch erfüllen. Dazu wurde das Bionische Vorgehensmodell nach Gramann [GRAMANN 2004 S. 95] mit den biologisch basierten Modellen, dem „Strategiemodell zur Zielbestimmung und Lösungsfindung in bionisch orientierten Entwicklungsprozessen“ nach Hill [HILL 1993 S. 155] sowie der Suchstrategie nach Rechenberg und Zerbst [ZERBST 1987 S. 26 ff] in der Anwendung verglichen.

## Systemsuche

Bezüglich des Findens geeignet erscheinender Lösungen erbrachte die Suchstrategie über Rechenberg und Zerbst auch nach wiederholter Anwendung verschiedener Suchbegriffe auch auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen keine Lösung. Während die ersten Schritte noch scheinbar problemlos abgearbeitet und ein Abgleich der Funktion und Randbedingungen und Gütekriterien zwischen technischen und biologischen Systemen durchgeführt werden konnte, so funktionierte die Übertragung dieser Ergebnisse auf eine effektive Suche geeigneter Phänomene in der Natur nicht. Ein möglicher Grund findet sich in der Anpassung des technischen Problems an die Natur sowie die übermäßige Einschränkung des biologischen Umfeldes, um eine Passgenauigkeit zu erreichen. Bemerkenswert sind jedoch an diesem Vorgehen neben der Suche über eine funktionale Beschreibung, die Betrachtung und der Vergleich von Randbedingungen und Gütekriterien, welche durchaus relevante Parameter einer bionischen Vorgehensweise darstellen. Einzig der Zeitpunkt der Überprüfung dieser Parameter scheint fragwürdig, wird ein potenzielles Lösungsfeld doch übermäßig eingeschränkt.

Umfangreich und teilweise schwer verständlich gestaltet sich eine Lösungssuche nach Hill, die sich dadurch in Ihrem Vorgehen zum Selbstzweck wandelt. Diese Vorgehensweise ist unterteilt in eine Zielbestimmung sowie eine Lösungsfindung. Erstere erscheint durch das strikte Vorgehen etwa über acht Unterschritte für viele Problemstellungen sehr aufwendig und übertrieben stringent. Sicherlich gibt es im technischen Umfeld ebenfalls Methoden, zum Beispiel die Methode QFD, die von einem Anwender ein solches Vorgehen mit entsprechendem Aufwand fordern, doch auch diese kämpfen häufig mit der Akzeptanz bei Entwicklern, selbst wenn die Ergebnisse für ein weiteres Vorgehen hilfreich und oft notwendig sind. Zwar kommt der Entwickler im zweiten Teil des Vorgehens nach Hill, der Lösungsfindung, durchaus auf biologische Phänomene, indem er über 15 technisch und biologisch beschreibende Funktionen in einem Katalog aus 191 biologischen Systemen adäquate Phänomene wählen kann – dadurch werden allerdings nur wenige für die jeweils spezifischen Problemstellungen potenziell passende Phänomene zugänglich. Durch diese ausgewählte Sammlung ausnahmslos interessanter Systeme reduziert sich die Lösungsfindung auf Standardlösungen. Auch die Lösungsanalyse wird außer durch eine kurze Beschreibung und meistens einem Bild nicht weiter unterstützt. Für die vorliegende Problemstellung konnten als biologische Systeme das Gebiss

eines Hamsters, die Mandibeln einer Raupe und der Kauladen eines Pfeilschwanzkrebses sowie die Radula einer Schnecke ermittelt werden.

Keinen Lösungskatalog im eigentlichen Sinne, sondern in Form eines Zugangs für Techniker zur Biologie bietet Gramann mit seiner Assoziationsliste, eingebettet in das Bionische Vorgehensmodell. Über dieses Werkzeug, verbunden mit Expertenbefragung sowie allgemeiner Literaturrecherche ließen sich so 28 biologische Systeme zur Fragestellung der Funktion „Stoff trennen“ und immerhin vier Systeme zur Funktion „Geräusch vermeiden“ finden. Auffallend ist hierbei, dass bestimmte Funktionen bionisch noch nicht ausreichend erforscht sind, sodass sich in keiner bionischen Literaturquelle mehr als ein System zur Lärmvermeidung findet.

## **Systemanalyse**

Dieser entscheidende Schritt für die erfolgreiche Umsetzung eines Effekts eines biologischen Systems wird zwar bei Hill und Gramann benannt, begrenzt sich bei Ersterem allerdings schon in der häufig nicht ausreichenden Beschreibung des biologischen Phänomens. Verweise auf die Literatur bieten nicht unbedingt mehr Information zu einem Effekt. So wird zwar zum Thema der Kreativität der Natur bereits beschrieben, dass Blattschneideameisen durch Vibration ihrer Mandibeln (Mundwerkzeuge) im Frequenzbereich von bis zu ca. 1000 Hz fähig sind, „durch weiche Blätter glatte Schnitte zu ziehen“ [HILL 1997 S. 67]. Diese für das Fallbeispiel sicherlich hilfreiche Information findet sich allerdings im Katalog zur Lösungsfindung selbst nicht mehr. Hier wird ohne vertiefende Information nur auf die Mandibeln von Raupen [HILL 1997 S. 148] verwiesen, um „Stoff zu trennen“. Im Bionischen Vorgehensmodell wird dem Analyseschritt selbst kein Werkzeug zur Seite gestellt. Der Entwickler ist angehalten, über Recherche in anderen Medien, die notwendige und spezifische Information zu erhalten und entsprechend zu interpretieren. Zerbst hingegen beschreibt aufgrund des Ziels seines Vorgehens, schon für eine zielgerichtete Lösungssuche Kriterien der eigentlichen Analyse, wie Funktion, Randbedingung und Gütekriterium.

Die Analyse der Systeme gestaltete sich häufig nicht wenig kompliziert. Wie in der Praxis üblich, ist die zur Verfügung stehende Zeit bis zu einer zu fällenden Entscheidung sehr kurz und damit für eine umfangreiche Analyse nicht vorhanden. Nötige Ressourcen fehlen meist. Falls die erforderliche Information nicht aus der Literatur oder von Experten zu erhalten ist, können für die Analyse nur einfachste Verfahren zur Anwendung kommen, in denen etwa über technisch einfach nachgebildete biologische Systeme aussagekräftige Ergebnisse über dieses System erlangt werden sollen. Selbst über orientierende Versuche können so nicht immer Resultate gewonnen werden, die eine Entscheidung hinsichtlich einer Umsetzbarkeit ermöglichen. Häufig treten bei der Versuchsdurchführung trotz erfolgter Versuchsplanung neue Schwierigkeiten auf, die das Gewinnen von Erkenntnissen verhindern. Im vorgestellten Bei-

spiel wurde festgestellt, dass biologische Systeme, sofern sie zerteilende und nicht zermahlende Aktionen ausführen, in der Regel über sägeförmige Schneidwerkzeuge verfügen. Die Vermutung der Effizienzsteigerung eines Rasenmähers über entsprechend geformte Schneiden konnte in einem orientierenden Versuch nicht bestätigt werden. Die bei der Rotation entstandene Unwucht im Betrieb der statt der Originalmesser am Rasenmäher angebrachten Versuchsklingen ließ keine orientierende oder belastbare Aussage über das Schneidverhalten zu. Die Unwucht ließ sich mit angemessenem Aufwand auch nicht entfernen und sorgte darüber hinaus noch für eine Gefährdung des Umfelds, sodass das Experiment schließlich abgebrochen werden musste.

Wurden biologische Systeme hinsichtlich der Wirkung des Gesamtsystems oder einzelner Effekte analysiert, so schließt sich an diesen Schritt eine Hypothesenbildung an. Eine Hypothese entsteht dabei aus der Summe der ermittelten Einzelinformationen und führt schließlich zur Entscheidung zur im Idealfall technischen Umsetzung oder zum Abbruch und je nach angewendetem Modell zur iterativen Durchführung ausgeführter Handlungen. Während der Analysephase, zur Bildung beziehungsweise zur Überprüfung dieser Hypothesen kann, wie im Fallbeispiel ersichtlich, eine teilweise technische Umsetzung biologischer Effekte stattfinden. Die eigentliche technische Umsetzung zur Lösung eines technischen Problems ist allerdings ein nachfolgender Schritt.

## Technische Umsetzung

Diese letzte Phase erfährt in jedem der drei Vorgehensmodelle nahezu keine methodische Unterstützung. Zerbst schreibt von der „technischen Nachahmung des biologischen Systems“, nennt immerhin kritische und zu beachtende Punkte bei der Umsetzung (z. B. Maßstabsprobleme) [ZERBST 1987 S. 48 ff]. Gramann beschreibt die „technische Umsetzung“ als explizit formulierten aber nicht weiter konkretisierten Schritt. Hier finden jedoch entscheidende Denkvorgänge und Handlungen statt, die letztlich den Erfolg der technischen Umsetzung biologischer Phänomene entscheidend beeinflussen. Dennoch wird in diesen letzten Schritt eine gewisse Selbstverständlichkeit implementiert, handelt es sich hierbei doch um die eigentliche Tätigkeit des Entwickelns von Produkten.

Als Bilanz lässt sich bei der Betrachtung verschiedener Vorgehensmodelle feststellen, dass die Problematik im Vorgehen des Lösens technischer Probleme über Effekte biologischer Systeme scheinbar überwiegend im Finden geeigneter biologischer Phänomene begründet ist. Dass diese Vermutung jedoch nicht zu halten ist, zeigen die Erfahrungen aus der Praxis, bei denen die Suche nach geeignet erscheinenden Phänomenen überwiegend erfolgreich verlaufen ist, gerade weil die vorgestellten Vorgehensmodelle existieren, die genau diesen Schritt überwiegend gut unterstützen. Wird kein Phänomen gefunden, so kann das natürlich daran liegen, dass im Bereich der Biologie einfach kein Phänomen zu einer spezifisch gestellten Problem-

stellung existiert. Viel häufiger und nahe liegend ist es jedoch, dass weiße Flecken in den über das Anwendungsgebiet einer Allgemeinen Bionik [ZERBST 1987 S. 17] erarbeiteten funktionsbasierten biologischen Lösungskatalogen existieren. Die Vielzahl möglicher biologischer Systeme lässt sich für die noch größere Menge an Phänomenen einfach nicht in einen Katalog mit wenigen hundert Systemen zusammenfassen. Hier können und wollen die Autoren keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Unmissverständlich deutlich zeigte sich bei der Anwendung die Tatsache, dass die Analyse und technische Umsetzung gefundener Phänomene und deren zugrunde liegende Effekte häufig enorme Schwierigkeiten bereiteten. Hier kommt es zu Schlussfolgerungen, die trotz geringer Information getroffen werden. Diese implementieren Fehler im Denken und Handeln bei der Umsetzung biologischer Phänomene. Neben dem erwähnten Fallbeispiel können repräsentativ für weitere, die Entwicklung eines osmotischen Aktors sowie die technische Umsetzung des Fortbewegungsprinzips von Geißeltierchen genannt werden. Hier fehlt eine geeignete methodische, fehlervermeidende Unterstützung des weiteren Vorgehens nach dem Finden scheinbar geeigneter biologischer Systeme.

### 4.2.3 Klassifikation biologischer Systeme zur technischen Umsetzung

Biologische Systeme und ihr Verhalten sind für den Entwickler meist komplett unbekannt. Diese Neuartigkeit ist einerseits aufgrund des technischen Innovationswunsches angestrebt, wirft allerdings weitere Probleme auf [Rutz, 1985 S. 155]. Dabei sind für biologische Systeme verschiedene Ebenen der Übertragung denkbar. Diverse Autoren haben sich mit der Umsetzbarkeit beschäftigt und Einteilungen formuliert. Nicht zuletzt, um Anwender für die Möglichkeiten der technischen Umsetzung eines biologischen Systems zu sensibilisieren:

HILL [1997 S. 47] beschreibt und beschränkt die Möglichkeiten zur Analogiebildung biologischer Phänomene in technische Anwendungen auf die Bereiche:

- Evolutionsgesetzmäßigkeiten
- Strukturen
- Funktionen
- Organisationsformen

Der erste Bereich befasst sich mit der Übertragung evolutionärer Optimierungsstrategien biologischer Systeme auf technische Produkte. Ergebnis der Forschung in diesem Bereich sind beispielsweise Evolutionsstrategien zur Optimierung technischer Systeme [RECHENBERG 1994; SCHWEFEL 1995]. Strukturen und Funktionen biologischer Systeme bilden den wohl bekannteren Bereich möglicher bionischer Anwendung. Hierzu existieren einige „biologisch optimierte“ technische Systeme, die mit ihrer biologischen Verwandtschaft beworben

werden. Organisationsformen biologischer Systeme können als Analogie für selbst regulierende effiziente und flexible technische Prozesse und Organisationsformen dienen. Diese Einteilung stellt einen unvernetzten Überblick über potenzielle Analogiebereiche biologischer Systeme dar.

Eine andere Darstellung findet sich in der hierarchischen Klassifikation zur Beschreibung biologischer Phänomene für potenzielle Analogien [MAK ET AL. 2002, MAK ET AL. 2004, SHU 2004]. Diese Art der Abstraktion beschreibt die drei Ebenen Forms, Behaviors und Principles, in die sich biologische Phänomene einordnen lassen können.

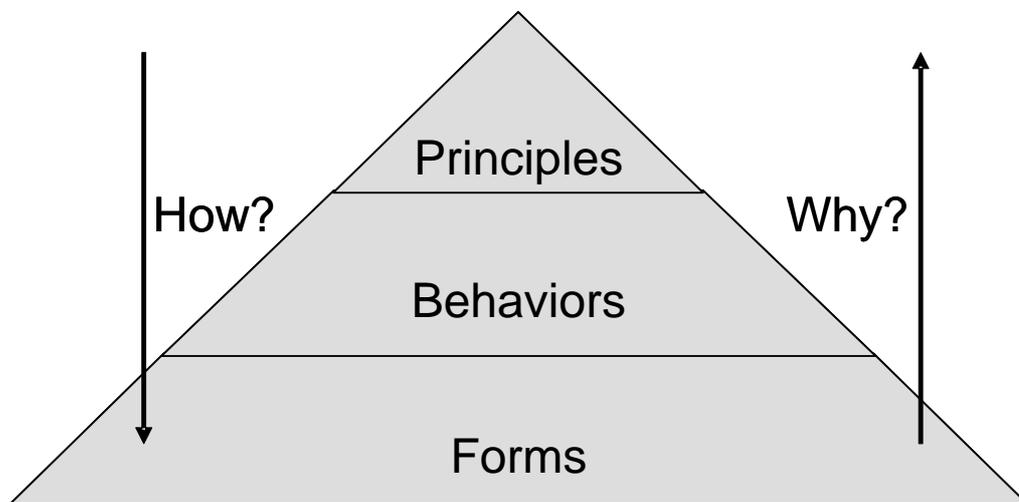


Abb. 4-5: Hierarchieebenen biologischer Phänomene [Mak et al. 2004]

In die erste Ebene Forms fallen Phänomene, die ausschließlich als Begriff genannt werden. Diese Referenzierung gibt weiter keine Information, auf welche Art Effekte und zur Erfüllung welcher Funktion sie wirken. Als Beispiel für diese Ebene wird die Blutreinigung von Nieren genannt. In der zweiten Ebene „Behavior“ finden sich die Phänomene selbst sowie die verantwortlichen Akteure und die Prozesse beschrieben, die schließlich dieses Phänomen darstellen. Ein Beispiel ist das Verhalten von Antikörpern und der Prozess der Phagozytose, zur Immunabwehr. Die dritte Ebene Principles, beschreibt als abstrakteste Klassifikationsform eines Phänomens den Grund seiner Existenz, d. h. die Antwort auf die Frage, warum dieses Phänomen in der Natur vorkommt. Ein Beispiel für Phänomene, die in diese Ebene fallen, ist das Prinzip der Regelung der Population durch das Angebot der Nahrung. Dieses Phänomen lässt sich insofern übertragen, dass die Zahl von Ratten in Städten dadurch reduziert werden könnte, dass der durch Menschen produzierte Müll für diese Tiere nicht mehr zugänglich wäre. Das Wechseln der Ebenen von Principles über Behaviors zu Forms erklärt jeweils, wie ein

Phänomen der übergeordneten Ebene umgesetzt wird, der Ebenenwechsel in die entgegengesetzte Richtung beschreibt, aus welchem Grund ein Phänomen auf der unteren Ebene existiert.

Diese Einteilungen ermöglichen es Entwicklern, verschiedene Übertragungsmöglichkeiten zu erkennen. In Fallstudien konnte mehrfach festgestellt werden, dass Entwickler zur Lösung technischer Probleme diese Einteilungen eher selten nutzten. Dies liegt auch in dem deskriptiven Charakter dieser Modelle begründet. Betrachtet man die Besonderheiten biologischer Systeme mit ihrer Wirk- und Funktionskomplexität, so leisten diese Modelle keine ganzheitliche Unterstützung über die Darstellung möglicher Abstraktionsebenen etwa für eine alternative Suche oder Analyse. Dafür müssten sie in ein Hilfsmittel zur technischen Umsetzung biologischer Phänomene integriert und entsprechend adaptiert sein.

### **4.3 Biologische Systeme als Verursacher komplexer Handlungssituationen**

Mit den vorgestellten Hilfsmitteln, die die Suche nach biologischen Systemen aufgrund einer funktionalen Beschreibung mit Katalogen unterstützen, lassen sich also biologische Systeme, sofern überhaupt scheinbar geeignete gefunden sind, nicht einfach analysieren, auswählen und technisch umsetzen. Dies konnte auch in dem beschriebenen Fallbeispiel festgestellt werden, welches.

Der Leser stellt sich an dieser Stelle sicherlich die Frage, warum diese Phasen bei der Anwendung für biologische Systeme dem technisch ausgebildeten Anwender Schwierigkeiten bereiten und damit die Ursache für Fehler sein sollen – sind doch die Tätigkeiten Analyse, Bewertung und Auswahl sowie die Konzeptionierung bei technischen Systemen alltägliches Geschäft.

Um diese Frage zu erörtern, muss man die biologischen Systeme in diesem Kontext genauer betrachten. Verschiedene Autoren beschreiben die Unterschiede zwischen biologischen und technischen Systemen [NACHTIGALL 1997, HILL 1997, ZERBST 1987]. Zusammenfassend lassen sich diese Unterschiede aber auf zwei im Folgenden beschriebenen Schlussfolgerungen konkretisieren:

#### **4.3.1 Biologische Systeme sind komplexe Systeme**

Über die Suche nach übertragbaren biologischen Effekten stößt man in der Regel nicht auf den Effekt selbst, sondern zuerst auf ein Phänomen, hinter welchem ein biologisches Gesamtsystem steht. Aussagen, wie „die Eule fliegt nahezu geräuschlos durch die Luft“ beschreiben zum einen das System (Eule) zum anderen das Phänomen (geräuschlos fliegen), das den Su-

chenden überhaupt erst auf dieses System hat aufmerksam werden lassen. Die Schwierigkeit ist nun, die Ursache dieses Phänomens, also den oder die verantwortlichen Effekt(e) zu ermitteln.

Die Komplexität biologischer Systeme unterscheidet sich dabei von der komplexer technischer Systeme, bei denen eine Vernetzung verschiedener, oft in integraler Bauweise konstruierter Bauteile in meist hoher Zahl vorliegt. Trotz dieser Randbedingungen lassen sich die schwierigsten technischen Produkte auch für allgemein technisch versierte Personen in kurzer Zeit analysieren. Die jeweiligen Funktionen und deren Vernetzung können den Bauteilen sowie den Baugruppen zugeordnet werden. Dabei können Grundprinzipien, wie das „Bottom Up“-Vorgehen<sup>1</sup> helfen, diese Systeme zu verstehen. Biologische Systeme hingegen, sind im Aufbau und der Vernetzung hingegen über einen langen Zeitraum „gewachsen“ und bestehen nicht aus Bauteilen mit jeweils einer zuordenbaren Funktion. So hat sich jedes einzelne Element über diesen Zeitraum -um der Evolution des Gesamtsystems willen- angepasst und unterstützt die Gesamtfunktion des biologischen Systems. Um schnell beschleunigen und laufen zu können, hat der Gepard nicht nur einen hervorragend ausgebildeten Bewegungsapparat mit nicht mehr einziehbaren Krallen, die für die notwendige Traktion sorgen. Auch die Lunge und das Herzkreislaufsystem beispielsweise, ermöglichen durch die Fähigkeit der Atemfrequenz- und Pulssteigerung in nur wenigen Sekunden eine äußerst erfolgreiche Jagd. Diese ganzheitliche Optimierung findet sich nicht nur bei dem Lebewesen selbst. Auch das Zusammenspiel verschiedener Lebewesen miteinander wurde und wird ständig verbessert. Beispiele finden sich etwa bei Fischeschwärmen, um den Einzelfisch durch das Gesamtverhalten des Schwarms vor Beute zu schützen, oder den bekannten Formationen bestimmter Zugvögel, um Energie zu sparen.

Die einzelnen Elemente eines biologischen Systems sind in ihren Funktionen nicht nur jeweils ein kleiner „funktionaler Baustein“ einer gesamt zu erfüllenden Aufgabe. Jedes dieser Elemente erfüllt in der Regel mehrere Funktionen oder trägt zumindest zur Erfüllung dieser bei. Damit ist eine so genannte Multifunktionalität gegeben, die über eine Integralität technischer Systeme hinausgeht. HILL [1997 S. 82] nennt hierzu als Beispiel den Vogelschnabel, der die Funktionen Ernähren, Verteidigen, Füttern, Nest bauen erfüllt. In diesem Beispiel zeigt sich in der Formulierung deutlich die unterschiedliche Sichtweise biologischer und technischer Betrachtung. Technisch gesehen und in diesem Fall methodisch korrekt müssten diese Multifunktionalitäten etwa durch Stoff aufnehmen, Stoff halten, Stoff trennen und Stoff verteilen beschrieben werden, zusätzlich lassen sich dann noch weitere denkbare Funktionen, wie Luftwiderstand verringern, Schall modulieren bzw. Geräusch erzeugen, und weitere nennen. Über die Gewichtung und Kombination all dieser Funktionen wird eine hohe Varianz in der

---

<sup>1</sup> Grundprinzip, bei dem zur Bildung eines Systemverständnisses jedem einzelnen Bauteil („Bottom“) dessen Funktion(en) zugeordnet und anschließend geclustert und zu einer höheren Funktionsebene zusammengefasst („up“) werden.

Gestalt erzeugt. Dies zeigt sich in der außerordentlich großen Anzahl im Tierreich verschieden gestalteter Schnäbel<sup>1</sup>. Die Natur hat dabei keine Probleme mit diesem Variantenreichtum zurechtzukommen, ist das Individuum in einer gesamtevolutionären Betrachtung unbedeutend.

Schließlich sind die verschiedenen Elemente, die für die Erfüllung einer Funktion zusammenwirken und so das Phänomen erst erzeugen, nicht unbedingt auf einer Abstraktionsebene zu finden. Da diese Art Systeme eine ganzheitliche Optimierung erfahren, finden sich die für das Phänomen erforderlichen Systemelemente auf Zellebene, in Größe einzelner Gliedmaßen, bis eben hin zu dem Gesamtsystem im Verbund mit anderen Systemen. Bei Letztgenanntem muss es sich nicht nur um ein Zusammenwirken gleicher Systeme handeln, auch verschiedene Systeme im Verbund können als Symbiose ein interessantes Phänomen darstellen.

Dies bedeutet natürlich nicht, dass zur technischen Umsetzung biologischer Phänomene alle in diesem System vorhandenen und zusammenwirkenden Effekte übertragen werden müssen. Es zeigt sich, dass bereits einzelne übertragene Effekte ein technisches System verbessern können. Die Betonung muss jedoch auf dem Wort „können“ liegen. Zeigt sich ein technisch übertragener biologischer Effekt nicht so wirkungsvoll, wie aus dem ursprünglichen System heraus vermutet oder stellt sich die Wirkung erst gar nicht ein, so kann das durchaus daran liegen, dass man „irgendwas (für eine Umsetzung) Wichtiges übersehen hat“ bzw. dass „... da noch was sein muss ...“. Diese Formulierungen fanden sich in den Fallstudien bei einer unglücklichen Anwendung des bionischen Vorgehens. Hier fehlte nachweislich entscheidende Information, wodurch es zu einem falschen Modell und somit zu einem Fehler kam.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass sich biologische Systeme zwar evolutionär angepasst und meist optimiert haben, dies aber immer unter und bezüglich der auf die Systeme wirkenden Randbedingungen. So verlor etwa der Mensch in seiner Entwicklung nach und nach sein „Fell“, da dieses zum Überleben immer weniger wichtig war. Die Evolution einzelner Elemente, wie etwa den Gliedmaßen folgt der Prämisse „am besten an die Randbedingungen angepasst“. Ein weiteres Beispiel sind Vögel, die sich nicht vor bestimmten Feinden durch das Fliegen retten können oder vielleicht nicht mehr müssen. Sie verloren diese Fähigkeit über einen mittelbaren Zeitraum. Andere Strategien wurden stattdessen optimiert, wie beispielsweise das Tarnen, um sich vor bestimmten Räubern zu verbergen oder die pure Größe, Kraft und Schnelligkeit, wie etwa beim Vogel Strauß, der mit den Tritten seiner Beine sogar Menschen gefährlich werden kann. Das Erkennen dieser Randbedingungen und der Abgleich mit denen der vorliegenden Problemstellung sind ebenfalls entscheidend für eine fehlerfreie Bewertung, Auswahl und technische Umsetzung eines biologischen Phänomens.

---

<sup>1</sup> Hierbei ist anzumerken, dass sich Schnäbel auch erst aus Mundöffnungen von Hohltieren entwickelt haben. Neben Schnäbeln existieren weitere erfolgreiche Möglichkeiten, die gleichen geforderten Funktionen gesamt oder zumindest einzeln zu erfüllen. Die Evolution ist dabei bei weitem noch nicht am Ende angekommen.

Nach DÖRNER [2004 S. 58] sind mit den hier aufgezählten Ausführungen die Merkmale komplexer Handlungssituationen beschrieben: Biologische Systeme besitzen eine hohe Anzahl auf verschiedenen Ebenen miteinander und mit der Umwelt vernetzte und evolutionär dynamische Elemente, die häufig und vor allem für den Ingenieur eine gewisse Intransparenz aufweisen. Auch eine Politelie einzelner Elemente lässt sich wiederfinden [BADKE-SCHAUB ET AL. 2004 S. 19FF., NACH DÖRNER ET AL. 1994 S. 21]. Damit ist die Bedingung für die potenzielle Entstehung von Problemen und damit für die Entstehung von Fehlern beim Denken und Handeln erfüllt.

### 4.3.2 Wissen und Information zu biologischen Systemen

Entscheidend für die Betrachtung biologischer Systeme und deren Anwendung auf technische Problemstellungen sind die Parameter Wissen und Information. Bei technisch geprägten Menschen ist bei einer Angewandten Bionik üblicherweise ein eingeschränktes biologisches (Grund-)Wissen beobachtbar. Auf Seiten der Biologie fehlt bis heute häufig eine unter technischen Gesichtspunkten geprägte Analyse biologischer Systeme. Diese sind häufig nur biologisch zueinander (Systematik der Biologie) und selbst klassifiziert (Anatomie und Morphologie). Die 1735 von Carl von Linné eingeführte und heute immer noch weiter vervollständigte Systematik der Biologie unterscheidet drei Domänen, wovon die Domäne Eukaryonten wiederum vier Reiche mit weiterer Systematik beschreibt. Hierunter fallen auch das Pflanzenreich sowie das Tierreich. Tiere werden etwa nach ihrer stammesgeschichtlichen Entwicklung in sechs weitere Kategorien (Stamm, Klasse, Ordnung, Familie, Gattung, Art) und dabei jeweils in Unterebenen eingeordnet. Allein mit dem Tierreich befasst sich ein eigener Wissenschaftszweig, die Zoologie. Diese betrachtet in eigenen Arbeitsgebieten auch die Anatomie und Morphologie, das heißt den inneren und äußeren Aufbau von Systemen, das Verhalten von Tieren und deren Physiologie. Gleiches gilt für die anderen Domänen und Reiche, beispielsweise der Botanik, die sich in zahlreichen Arbeitsgebieten mit Pflanzen beschäftigt [WIKIPEDIA 2005C].

Die hohe Zahl verschiedener biologischer Systeme macht eine solche Taxonomie notwendig und führt dazu, dass sich viele biologische Teildisziplinen mit der Erforschung dieser Lebewesen befassen. Dabei sind deren Forschungsergebnisse bei der Analyse biologischer Systeme zur technischen Problemlösung nicht zwangsweise hilfreich. Das bedeutet, dass sie zur Anatomie und Morphologie vor allem bezüglich evolutionärer Zusammenhänge analysiert werden und auch die physiologische und verhaltensspezifische Analyse biologisch geprägt abläuft. So werden Merkmale biologischer Systeme und ihre Elemente auf einer technisch sehr oberflächlichen Ebene beschrieben. Damit lässt sich zwar sehr viel „biologische“ Information zu einem Suchbegriff finden, wirklich nützlich zur Analyse einer vor allem spezifischen technischen Fragestellung, ist sie nur in wenig Fällen.

Damit liegt eine Wissenslücke vor, die darüber hinaus von dem Ausführenden einer Angewandten Bionik erst erkannt werden muss. Notwendige Information muss gesucht und gefunden werden. Hierbei liegen meist beide Ursachen für Schwierigkeiten und damit für Fehler bei diesem Schritt vor: Einerseits kann der richtige Informationsbaustein nicht zu finden sein, weil er nicht existiert, andererseits kann er in einer „biologischen Informationsflut“ verborgen, ebenfalls nicht auffindbar sein. Aus dieser Flut geeignete und qualitativ hochwertige Informationsbausteine auszuwählen, die im gesamten Wissensbauwerk eine tragende Rolle übernehmen können, gestaltet sich durchaus nicht einfach. Gefundene Bausteine müssen schließlich mit selbst generierter Information und dem bereits bestehenden Wissen erfolgreich kombiniert werden. Das bedeutet, dass Zusammenhänge erkannt und Schlussfolgerungen abgeleitet werden müssen, um einen biologischen Effekt schließlich technisch umzusetzen. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich, weil Strukturen und Prozesse biologisch üblicherweise in Prosa beschrieben vorliegen. Das bedeutet, dass Information codiert dem Entwickler nicht unmittelbar augenscheinlich wird. In Zusammenhang mit einer Forderung nach quantitativen Angaben wird so eine große Menge an technisch durchaus nützlicher Information nicht für eine technische Analyse verwendet. Die Schwierigkeiten mit der Generierung und Verarbeitung von „biologischer“ Information werden in einem im Folgenden beschriebenen Fallbeispiel dargelegt.

Inzwischen wird jedoch versucht, den Mangel biologischer Systeme bezüglich technischer Information auszugleichen, indem diese systematisch für eine technische Anwendbarkeit überprüft werden [z. B. ZERBST 1987]. Angesichts der unüberschaubaren Menge an Lebewesen und damit an Phänomenen und Effekten, die die Natur zu bieten hat, eine Aufgabe, die noch lange Zeit in Anspruch nehmen wird und den Entwickler nur in seltenen Fällen wirklich unterstützen kann.

### 4.3.3 Fallbeispiel

In einem Projekt sollte das Phänomen des Flohsprungs auf seine technische Anwendbarkeit hin analysiert und in geeigneter Weise umgesetzt werden. Manchem Leser ist sicherlich bekannt, dass Flöhe (Ordnung: Siphonaptera) bei einer Körperlänge von nur 1,5 bis 4,5 mm eine Sprungkraft entwickelt haben, die mit bis zu fast einem Meter Weite mehr als beeindruckend ist. Ihre Flügel sind, trotz dem sie zur Überordnung der Neoptera (Neuflügler) gehören, degeneriert. Flöhe besitzen einen seitlich stark abgeflachten Körper und haben einen äußerst festen Chitinpanzer. Diese Parasiten ernähren sich vom Blut warmblütiger Wirtstiere, das sie mit ihrem Stechrüssel aufnehmen.

Das Vorgehen wurde mithilfe des Bionischen Vorgehensmodells [GRAMANN 2004 S. 95] geplant und durchgeführt. Das Suchziel und das biologische System waren auf abstrakter Ebene

bereits festgelegt. Der biologische Effekt, welcher es dem Floh ermöglicht, extreme Sprünge auszuführen, sollte in ein technisches System umgesetzt werden, welches innerhalb einer kurzen Zeitspanne einen hohen Kraftimpuls bzw. eine hohe Beschleunigung benötigt. Kern der Aufgabe war es also einerseits, das System Floh zu analysieren, andererseits, die Erkenntnisse dieser Analyse technisch umzusetzen.

Die Analyse startete mit einer Internetrecherche, Literaturrecherche und Expertenbefragung. Eine Schwierigkeit stellte es dar, auf die spezifische Problemstellung, nämlich die Frage, wie funktioniert der Flohsprung „technisch“ gesehen, eine für eine Umsetzung ausreichend genaue Antwort zu bekommen. Über Biologen, worunter sich auch ein Entomologe befand, konnte die gesuchte Information nicht ermittelt werden. Die Stichwortsuche über Google™ im Internet ergab auf das Stichwort „Floh“, 647.000 Treffer, auf die Stichworte „Floh Sprung“ noch 13400 Seiten und auf die Stichwort „Siphonaptera Sprung“ immerhin 150 Seiten [Schmidt 2005]. Das Vorgehen der Suche nach Information im Internet über die biologisch korrekten lateinischen Bezeichnungen biologischer Systeme wird für eine Effektivität und Effizienz auch von Gramann vorgeschlagen [GRAMANN 2004 S. 101]. Bei der Internetrecherche, wie auch bei der Suche über die Literatur war die bei den wenigen relevanten Quellen enthaltene Information meist reduziert auf die sehr abstrakte Formulierung des Phänomens dieses biologischen Systems, dass der Floh trotz seiner geringen Größe von ca. 1-3 mm in kürzester Zeit auf eine Sprunghöhe von etwa 30 cm kommt und bis zu 1 m weit springen kann. Diese Aussagen brachten die Entwickler für eine erfolgreiche Analyse nicht weiter. Zur Erklärung muss an dieser Stelle ebenfalls gesagt werden, dass über 10.000 verschiedene Floharten existieren, die in einem Zeitraum von 1953 bis 1983 allein nur taxonomiert wurden [ROTHSCHILD ET AL. 1953-1971]. Dieser Katalog füllt mehrere Ordner. Nach einer überaus langwierigen Suche wurden wenige Veröffentlichungen gefunden, in denen zum Verständnis des Prinzips der Flohsprung zumindest ausreichend beschrieben war [z.B. WIGGLESWORTH 1955, DETTNER ET AL. 2003]. Hilfreich waren vor allem REM-Aufnahmen von Flöhen. Wenige quantitative Angaben über Längenverhältnisse, Kräfte, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten usw. fanden sich über viele Umwege schließlich in einer Veröffentlichung, die sich von Seiten der Biologie mit dem Sprung des Flohs beschäftigt hatte [BENNET-CLARK ET AL. 1967]. Inhalte konnten zur Analyse aus verschiedenen Gründen, wie Berechnungsfehler und nicht nachvollziehbaren ungenauen Annahmen, nur eingeschränkt übernommen werden, jedoch diente sie als Bestätigung für das generierte theoretische Modell des Flohsprungs. Betrachtet wurde dabei der *Pulex irritans* (Menschenfloh), da dieser in der Literatur noch am umfangreichsten betrachtet wurde.



Abb. 4-4: *Pulex Irritans* REM [Schmidt 2005]

So verwendet der Floh muskelunterstützt zwei technisch bekannte Prinzipien, um diese Höchstleistung zu vollbringen. Über das Prinzip des Kniehebels bringt der Floh seinen Beinapparat in eine selbsthelfend verriegelte Stellung. Nun kann das Sprungsystem über Muskelkontraktion des Dorsoventralsmuskels (dvm), des Hauptmuskels, der in der Thoraxkapsel am Notum entspringt, ähnlich dem Abzughahn einer Pistole oder eines Gewehrs, vorgespannt werden. Die Energie wird dabei in einem Protein namens Resilin gespeichert. Dieses ist ein elastischer Körper, eigentlich eine biologisch entwickelte Druckfeder, die durch Verformung die zum Sprungimpuls benötigte Energie speichert. Ausgelöst wird dieses gespannte System durch die Kontraktion eines seitlich am Dorsoventralsmuskel angebrachten, quer ziehenden weiteren Muskel, des frontalen Depressormuskels (mdt). Dieser verändert die Lage durch Verlagerung des Hauptmuskels und gleichzeitiger Veränderung dessen Zugrichtung über den Totpunkt, sodass die Sprungbewegung ausgeführt wird. Das Resilin seinerseits unterstützt die Rotation des Sprunggelenks aus dem Zug des Dorsoventralsmuskels, indem es sich gleichzeitig entspannt und die gespeicherte Energie in die Sprungbewegung abgibt. Dabei beschleunigt der Floh seinen Körper, solange das Flohbein Kontakt zum Boden hat.

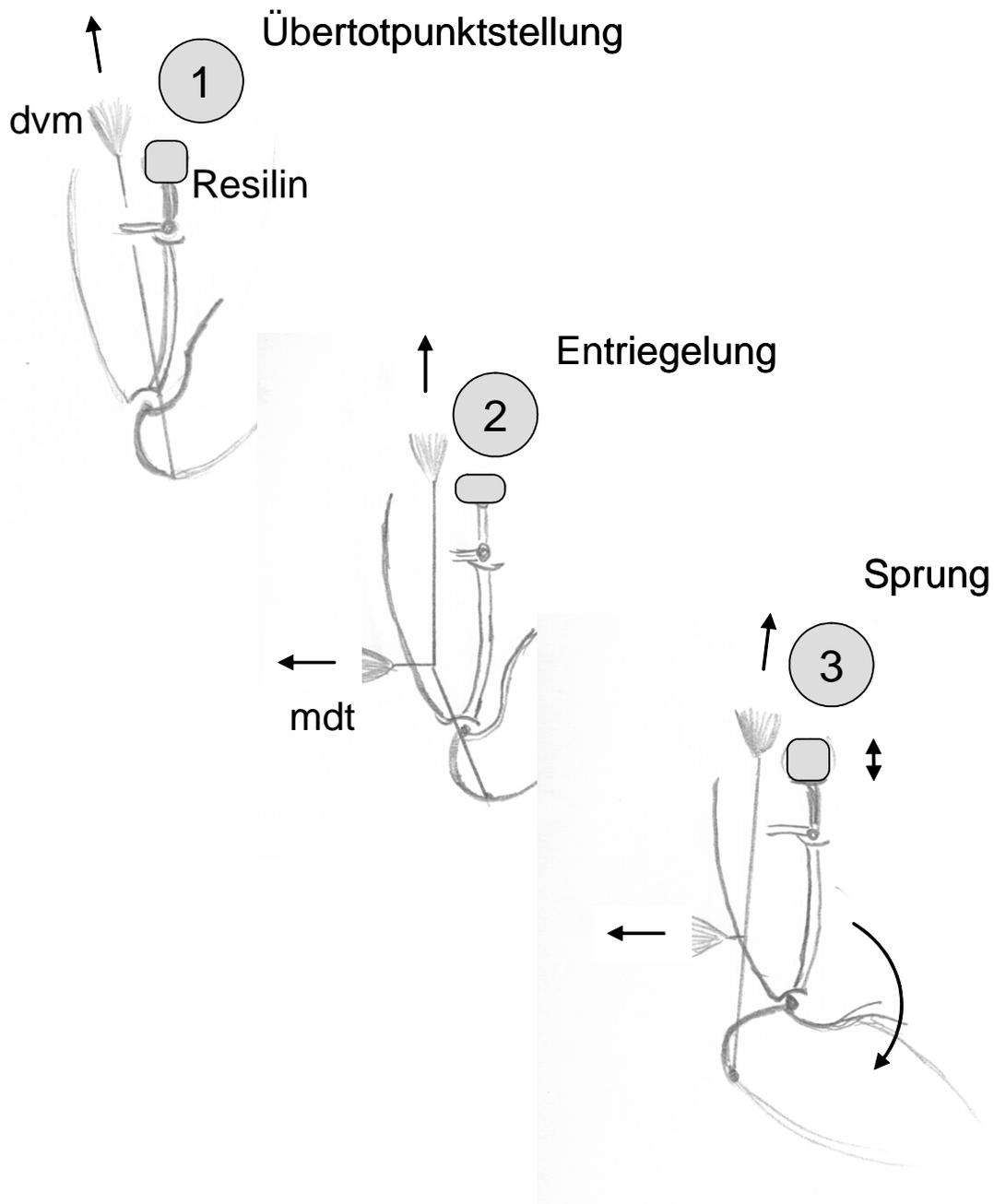


Abb. 4-5: Prinzip des Flohsprungs: Flohbein – Schematisch mit Dorsoventralmuskel (dvm), frontaler Depressormuskel (mdt) und Resilin.

Erkenntnisse aus diesem Fallbeispiel lassen sich bezüglich Wissen und Information sowie bezüglich der Komplexität biologischer Systeme ziehen. So gestalteten sich die Informationssuche und schließlich die Analyse biologischer Systeme hier, wie auch in vielen anderen An-

wendungsfällen eines bionischen Vorgehens nicht zuletzt aus den folgenden Gründen schwierig und ermöglicht Denk- und Handlungsfehler:

- Wenn nicht nach biologischem Grundwissen zu einem Phänomen, sondern in Form einer technisch geprägten Analyse, nach physikalischen Zusammenhängen und Leistungen biologischer Systeme, deren Phänomene oder den dahinter liegenden Effekten gesucht wird, existiert auf biologischer Seite üblicherweise wenig „technisch“ verwertbare Information. Auch Spezialisten haben sich mit den technischen Hintergründen biologischer Systeme meist noch nicht beschäftigt. Der Ingenieur muss daher z. B. aus Bildern (REM) Rückschlüsse und Interpretationen auf Funktionsweisen leisten.
- Allgemeine Information über ein gefundenes Phänomen existieren in Literatur und Internet häufig in einer so großen Zahl, dass die Suche nach relevanter Information der Suche einer Stecknadel im Heuhaufen gleicht.
- Die verfügbare Information muss in einen technischen Zusammenhang gebracht werden, um ein Wissen zu generieren, d. h. das Wissensbauwerk errichten zu können. Ein wesentlicher Fortschritt im Fallbeispiel war gelungen, als der Effekt des Flohsprungs über zwei physikalische Prinzipien beschrieben werden konnte, dem Kniehebelprinzip und der Energiespeicherung über Verformung elastischer Körper.
- Biologische Systeme sind komplexe Systeme, die einer ganzheitlichen Optimierungsstrategie folgen. Lebewesen in Größe eines Flohs oder darunter können nicht mehr „einfach so“ und durch bloßes Betrachten analysiert werden. Analysegeräte sind teuer und nicht immer verfügbar. So ließen sich trotz intensiver Suche keine Aufnahmen von springenden Flöhen in der für eine Analyse erforderlichen zeitlichen Verzögerung und Auflösung finden.
- Unter Umständen können und werden wesentliche Effekte eines beobachtbaren Phänomens auf weiteren Ebenen nicht analysiert bzw. gar nicht erst untersucht. Wahrscheinlich ist die generierte und technisch beschriebene Information über das Phänomen des Flohsprungs ausreichend, um einen wesentlichen Effekt in technischen Systemen zu erzielen. Jedoch sind weitere „Hilfs“-Effekte im System durchaus denkbar. So ist das Sprungvermögen möglicherweise zusätzlich auch die durch die Physiologie, wie etwa durch Bewegungsumfänge von Gelenken, oder der neuronalen Steuerung und Regelung des Sprungs selbst weiter unterstützt. Dieses wurde im Fallbeispiel jedoch nicht weiter analysiert.
- Neben der Analyse des biologischen Systems selbst ist auch die Betrachtung der Randbedingungen und der Umgebung eines biologischen Systems problematischer, als es auf den ersten Blick scheint. Eine einfache, die Randbedingungen nicht oder nur rudimentär betrachtende, technische Umsetzung ist fürs Erste sicherlich möglich, macht aber den Anspruch an eine optimale Umsetzung eher unwahrscheinlich. Im Fallbeispiel stellt sich in

diesem Punkt unter anderem die Frage, welche der physiologischen Merkmale für das Springen notwendig und hilfreich sind und welche für andere Funktionen optimiert sind. Ist etwa die auffällig abgeflachte Form des Körpers auch aufgrund Strömungseffekten so ausgeformt, oder hilft sie dem Floh nur, sich im Fell der Wirtstiere zu bewegen.

Über das beschriebene Fallbeispiel ist ersichtlich, dass die Analyse, Auswahl und technische Umsetzung von biologischen Systemen, ihrer Phänomene und den dahinter liegenden Effekten komplexe Handlungssituationen darstellen und noch einen Schritt schwieriger als die Suche nach einem Phänomen sind. Schließlich denkt man unmittelbar an den Floh und sein Sprungvermögen, wenn für die technische Problemstellung „hohe Beschleunigung ermöglichen“ bzw. „großen Impuls generieren“ im Umfeld der Biologie nach Phänomenen gesucht wird. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Versuch der Lösung technischer Probleme über biologische Effekte zahlreiche Situationen beinhaltet, die für den Anwender Schwierigkeiten und selbst ein Problem darstellen können. Daher kann es wie bei jeder Art von Problemen besonders leicht zu Fehlern im Vorgehen kommen.

Dennoch konnten zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für die technische Umsetzung des Phänomens des Flohsprungs und seiner wirkenden Effekte festgestellt werden. Eine der ausgewählten Anwendungen stellt die Umsetzung des Prinzips zur Optimierung von Injektionspritzen dar. Eine hohe Einstichgeschwindigkeit vermeidet Schmerzen durch das Eindringen der Nadel in die Haut.

#### **4.3.4 Fehler und deren Ursachen bei der Anwendung einer Bionik**

Der Mensch hat vor allem seit dem 19. Jahrhundert durch enormen Einsatz eine eigene, menschliche Technik entwickelt, die zwar natürlich noch immer physikalischen Naturgesetzen gehorcht, sich aber in bestimmten Bereichen mehr und mehr von der Natur entfernt hat. Möchte ein Entwickler die Bionik nicht nur als kreatives Element sondern als wirkliche Problemlösemethode nutzen und dabei ein biologisches System analysieren, so muss er sich trotz geringen Wissensstandes einer Komplexität aus einer unüberschaubaren Vernetzung einer Vielzahl an einem Phänomen beteiligten Effekten stellen. Durch diese Komplexität können üblicherweise hilfreiche prinzipielle Vorgehensweisen der Entwicklungsmethodik, wie etwa die Teilproblemzerlegung und Teillösungssuche zu Fehlern führen, wenn etwa Einzellösungen nicht mehr zusammenpassen [VESTER 2000 S. 47/48]. Bei der Suche in der Biologie und der Analyse ihrer Systeme sind ein „mehrdimensionales [und vernetztes] Denken“ und ein Bewusstsein für die besonderen Umstände der Anwendung dieses Vorgehens notwendig.

Nicht zuletzt, weil der Mensch als handelnde Person bei einem bionischen Vorgehen mit den generellen Schwierigkeiten einer allgemeinen Problemlösung konfrontiert wird, gelten die gleichen menschlichen Voraussetzungen als Ursachen für Fehler [DETJE 1996, DÖRNER 2004,

STROHSCHNEIDER ET AL. 1987]. Die beschriebenen Verhaltensweisen handelnder Personen kommen aufgrund der besonderen Umstände auch bei dem hier betrachteten Vorgehen als unmittelbare Ursache für Fehler in Denk- und Handlungsvorgängen bei einem bionischen Vorgehen besonders in Betracht:

- Zentralreduktion: Die bewusste Reduzierung eines Systems auf eine zentrale Variable, die verantwortlich für das Verhalten eines Systems scheint, führt zu einer subjektiven Überzeugung der Richtigkeit dieser Annahme.
- Nichtbeachtung der Ablaufgestalt und Dynamik von Prozessen: In diesem Fall wird nur eine Struktur eines Systems nicht aber die Gestalt seines Prozesses und dessen Dynamik betrachtet.
- Übergeneralisierung/ungeprüfte Übernahme von Vorwissen: Die Generalisierung einer Erkenntnis auf ähnliche Systeme oder Systemelemente ist gerade bei biologischen Systemen gefährlich, da hier eine hohe Funktionsvarianz von Elementen trotz oft gleichen Ursprungs vorherrscht. Gleiches gilt für eine ungeprüfte Übernahme von Vorwissen.
- Strukturextrapolation: Aufgrund gleicher Systemelemente und gleicher Relationen wird auf ein gleiches Verhalten geschlossen.
- Dekonditionalisierung von Bedingungen: Die (Rand-)Bedingungen unter denen Funktionen durch bestimmte Elemente ausgeführt werden, werden nicht beachtet.

Dies alles kann zu einer ungenügenden Modellbildung führen. Dadurch fehlt das Wissen über das Systemverhalten. Hypothesen und Entscheidungen für bestimmte Handlungen werden unter falschen Voraussetzungen getroffen. Diese Fehler provozierenden Verhaltensweisen, würden sich durch kritisches Hinterfragen, also durch Reflexion erkennen und frühzeitig beeinflussen lassen. Häufig unterbleibt aber eine Kontrolle der Entscheidungs- und Handlungsschritte und verhindert damit eine frühzeitige Überprüfung der Umsetzbarkeit übertragbar erscheinender Effekte.

Um die Vermeidung dieser besonderen Fehlerursachen im menschlichen Verhalten und die technische Problemlösung über biologische Systeme zu unterstützen, kann der Umgang mit Komplexität weder einfach vermittelt noch erlernt werden [SCHAUB 1996]. Auch das Bewusstmachen eines allgemeinen, typisch menschlichen Fehlverhaltens ist nur bedingt hilfreich, da dieses von unterschiedlichen Faktoren wie der jeweils vorherrschenden Situation abhängig ist. Eine entscheidende Hilfe für Entwickler bei der technischen Problemlösung durch biologische Systeme ist die Verwendung geeigneter Hilfsmittel, also Methoden zum Umgang mit Komplexität und zur frühzeitigen Informationsnutzung einerseits verbunden mit einem bewusst kritischen und selbstreflektierenden Vorgehen andererseits. Zwar ist das Sprichwort „aus Fehlern lernt man“ in dem hier betrachteten Kontext mehr als zutreffend,

dennoch versucht man im Bereich der Entwicklungsmethodikforschung, Methodenvermittlung nicht auf der Basis von Fehlern durchzuführen.

#### **4.4 Ergebnisse der Umfrage „Bionik als Methode“**

Eine Stichprobe in verschiedenen Unternehmen aus dem Bereich des Maschinenbaus ergab, dass die Anwendung der Bionik als Methode zur technischen Problemlösung trotz ihres offensichtlich sehr großen Potenzials eine eher untergeordnete Rolle spielt. Obwohl diese Befragung einen nur geringen Umfang besaß, kann sie doch als Indiz für Probleme im Umgang mit dieser Methode und als Basis einer Optimierung dienen. Von 19 befragten Ingenieuren aus dem Entwicklungsbereich gaben 42 Prozent an, die Lösungssuche über die Natur noch nie durchgeführt zu haben. Eine regelmäßige Anwendung konnte sogar keiner der Befragten bestätigen. Als Gründe einer Nicht-Anwendung wurde überwiegend angegeben, dass das Know-how fehlt Effekte zu analysieren (42 Prozent) sowie einen allgemein hohen Zeitaufwand bedeutet (32 Prozent). Mangelndes Wissen über biologische Effekte und den wirkenden biologischen Randbedingungen, die schlechte methodische Unterstützung nicht nur bei der Feststellung einer Umsetzbarkeit wurden häufig als Probleme im Vorgehen genannt. Daraus ergeben sich die genannten Anforderungen an ein effektives und effizientes bionisches Vorgehen, frühzeitig Aussagen über die Eignung eines biologischen Phänomens zu ermöglichen, das „einfachere Finden von biologischen Effekten, die auf das jeweilig zu bearbeitende Problem anwendbar sind“ zu unterstützen.

Das legt die Vermutung nahe, die Bionik funktioniere nur als reine Wissenschaftsdisziplin, bei der Biologen und Ingenieure biologisch basierte technische Anwendungen „erforschen“. Tatsächlich konnte in zahlreichen Projekten des Lehrstuhls mit Unternehmen festgestellt werden, dass Entwicklern konkrete, im Tagesgeschäft auftretende technische Probleme über die moderierte methodisch unterstützte analoge Übertragung biologischer Phänomene und deren Effekte effektiv und effizient lösen können.

#### **4.5 Schlussfolgerungen für die Anwendung biologischer Systeme zur Lösung technischer Problemstellungen**

Die Bionik als allgemeine Bionik [ZERBST 1987] ist vielen als Wissenschaftsdisziplin bekannt, bei der Forscher versuchen, biologische Phänomene beispielsweise bezüglich ihrer Funktionen, Strukturen, Organisationsformen oder evolutionären Entwicklungen unter technischen Gesichtspunkten zu analysieren. Über diese Grundlagenforschung wurden und werden innovative Lösungen für technische Systeme generiert. Im Bereich der Ingenieurwissenschaften sind Produktentwickler üblicherweise zuerst nicht mit Lösungen, sondern mit techni-

schen Problemstellungen konfrontiert. Hier kann die Bionik dennoch aufgrund des hohen Potenzials effektiv und effizient entwickelter biologischer Systeme als eine „Methode“ zur Lösung technischer Probleme über die analoge Übertragung von Prinzipien und Effekten dienen. Für diese angewandte Bionik stellt die allgemeine Bionik gewissermaßen eine Grundlagenforschung dar. Hier können bereits analysierte und in bionischen Lösungskatalogen zusammengefasste biologische Phänomene durchaus zur Lösung technischer Probleme verwendet werden. Häufig lassen sich aufgrund der Unvollständigkeit dieser Kataloge, nicht zuletzt aber auch mangels anderweitiger geeigneter methodischer Unterstützung im Vorgehen, keine Analogien zu den speziellen Problemstellungen finden. Somit ist der Produktentwickler gezwungen, auf sich allein gestellt, selbst nach passenden Phänomenen zu suchen und diese bezüglich ihrer Effekte zu analysieren.

Die Suche, vor allem aber die Analyse biologischer Phänomene sowie die technische Umsetzung möglicher Effekte zur Lösung technischer Problemstellungen gestalten sich für einen Entwickler in der Regel nicht einfach. Eine mögliche Barriere und damit Ursache für Probleme und das Entstehen von Fehlern bei einem bionischen Vorgehen stellen die biologischen Systeme selbst dar. Sie besitzen eine hohe Komplexität in ihrem Aufbau und der Erfüllung von Funktionen. Sie bestehen aus einer Vielzahl an Elementen, die über verschiedene Ebenen hinweg vernetzt eine Multifunktionalität aufweisen. Hierzu kommt eine weitere Barriere, dass Ingenieure üblicherweise im Bereich der Biologie über wenig Wissen verfügen. Ein Mangel, der die Analyse biologischer Systeme erschwert. Hier sind Ingenieure Novizen und nicht Experten. Damit benötigen sie mehr Ressourcen, sind langsamer, unpräziser und ineffizienter [SONNENTAG NACH HERBIG 2001 S. 25], selbst wenn sie als Experten im technischen Bereich durchaus Elemente ihres Handelns übertragen könnten, die ihnen Vorteile bei der Anwendung biologischer Phänomene bringen, wie etwa der erlernte grundsätzliche Umgang mit schwierigen, technisch komplexen Situationen, eine kognitive Flexibilität und situationspezifische Regelanwendung [DÖRNER & SCHÖLKOPF NACH HERBIG 2001 S. 25]. Hinzu kommt neben dem persönlichen Wissensmangel, also dem Mangel an vorhandener Information, die Schwierigkeit, notwendige Information überhaupt zu erhalten. Einerseits ist zu biologischen Systemen jeweils eine unüberschaubare Menge an Information vorhanden. Diese ist für die technische Problemstellung jedoch überwiegend nicht relevant. Die Formulierung in Prosa erschwert als technikfremde Codierung das Filtern relevanter Inhalte zusätzlich. Andererseits sind biologische Systeme nur in den wenigsten Fällen bereits unter rein technischen Gesichtspunkten analysiert worden, quantitative Information liegt daher kaum vor.

Das Bionische Vorgehensmodell [GRAMANN 2004] zeigt im Gegensatz zu den bekannten allgemeinen Vorgehensmodellen der Bionik grundsätzlich unterstützende Handlungsschritte für eine angewandte Bionik. Entwicklern werden zusätzlich zu einzelnen Schritten Hilfsmittel zur Seite gestellt, die das Bearbeiten der einzelnen Phasen unterstützen sollen. Bestimmte erfolgsentscheidende Handlungen, wie eine zielgerichtete Suche, eine frühzeitige qualitative Analyse

und Auswahl geeigneter Systeme oder die Unterstützung der Analyse durch eine geeignete Taxonomie werden auch in diesem Modell aufgrund seines eigentlichen Zwecks einer allgemeinen Vorgehensweise nicht ausreichend unterstützt.

Generell lässt sich feststellen, dass Methoden angewendet werden, wenn Entwickler vor Problemen stehen. Dadurch sollen vorhandene Barrieren umgangen werden. Wie bei vielen anderen Methoden befindet sich der Entwickler auch bei der Bionik zur Lösung technischer Probleme in einer komplexen Handlungssituation. Diese stellt für ihn wiederum ein Problem dar. Methoden und Hilfsmittel sollen den Entwickler jedoch eigentlich unterstützen und ihn nicht vor weitere Probleme stellen. Die Anwendung einer nicht adäquaten Methode führt zu einer Verkomplizierung statt zu einer Vereinfachung einer Situation.

Der Mangel an Information und geeigneter methodischer Unterstützung sowie typischen menschlichen Verhaltensweisen führen zu reduzierten Modellen. Damit ist auch die Möglichkeit von Denk- und Handlungsfehlern gegeben, die zu einer Ineffizienz und Ineffektivität bei der Anwendung der Methode Bionik führen können. Die Folge kann nicht selten eine generelle Frustriertheit in Bezug auf die Anwendung dieser Methode sein. Dies alles führt schließlich dazu, dass die Lösung technischer Probleme durch biologische Phänomene trotz des großen Potenzials nur eine geringe industrielle Anwendung erfährt.

Die Bionik ist aufgrund der aufgeführten Punkte als entwicklerspezifische anwendungsorientierte Methode zur Lösung technischer Probleme über biologische Phänomene noch nicht ausgereift. Sie führt bisher nur in Ausnahmefällen zu wirklich innovativen Lösungen und ermöglicht an vielen Stellen aufgrund mangelnder Unterstützung des Entwicklers Denk- und Handlungsfehler. Zur Optimierung dieser Methode lassen sich zwei wesentliche Ansprüche ableiten:

Es müssen geeignete Hilfsmittel geschaffen werden, die eingebettet in ein bionisches Vorgehen eine Handhabbarkeit der besonderen Komplexität biologischer Systeme ermöglichen helfen und Rücksicht auf die besonderen Umstände der praktischen Anwendung einer solchen Methode im industriellen Umfeld sowie auf den Wissensstand der Anwender nehmen. Fehler provozierende Schritte bei einem solchen Vorgehen sind priorisiert zu betrachten. Das bedeutet die Unterstützung einer zielgerichteten Suche nach geeigneten Phänomenen, vor allem aber eine deutliche Assistenz bei einer abstrakten frühzeitigen Analyse dieser Phänomene. Um eine höchstmögliche Effizienz zu erhalten, ist eine fehlerarme Verarbeitung der zur Verfügung stehende Information essenziell.

Zur Vermeidung von Denk- und Handlungsfehlern müssen kritische Stellen der Anwendung von unterstützenden Hilfsmitteln vermieden oder zumindest vermittelt werden. Zusätzlich sind Kontrollelemente zu integrieren, die den Anwender zur Reflexion bzw. zur bewussten Auseinandersetzung mit seiner Entscheidung, seiner Handlung sowie seinen Ergebnissen zwingt. Bezüglich der häufig notwendigen Adaption von Methoden auf spezifische Situatio-

nen bedeutet dies, dass die Information über adaptierbare und fixe Methodenbestandteile zu vermitteln sind.



## **5 Hilfsmittel zur Unterstützung der Bionik als Methode bei Entwicklungstätigkeiten**

*Es existieren bereits verschiedene Hilfsmittel, die den Anwendern für die Problemlösung über die Natur einen möglichen Weg aufzeigen. Dabei zeigt jedes noch Schwächen in einzelnen Phasen einer solchen Angewandten Bionik. Dem Entwickler kommt das Bionische Vorgehensmodell sehr nahe und soll daher im weiteren als Basis dienen. Dieses Kapitel beschreibt ein methodisches Vorgehen, welches die erkannten und beschriebenen und damit die Fehler provozierenden Schwierigkeiten, auf die viele Entwickler bei der Suche und Analyse biologischer Systeme zur technischen Problemlösung stoßen, aufgreift. Durch den Einsatz dieses Hilfsmittels kann die Effektivität und Effizienz einer Angewandten Bionik gesteigert und Fehler im Vorgehen besonders bezüglich des zentralen Faktors „Information“ vermieden beziehungsweise verringert werden. Darüber hinaus ist die Integration in das Bionische Vorgehensmodell möglich. Schließlich lassen sich so zentrale Forderungen für eine praktische Anwendung in der Industrie erfüllen und das hohe Potenzial natürlicher Systeme erfolgreicher nutzen.*

### **5.1 Randbedingungen zur Erstellung eines Hilfsmittels**

Zur Entwicklung und Anwendung eines methodischen Hilfsmittels sind verschiedene Einflussparameter zu beachten, möchte man eine erfolgreiche Problemlösung durchführen und dieses Hilfsmittel nicht nur aus reinem Selbstzweck anwenden. Über die Betrachtung der Randbedingungen für einen Einsatz lassen sich entscheidende Faktoren erkennen und dadurch Fehlerquellen reduzieren. Im vorliegenden Fall ergibt sich die Besonderheit, dass unter diesen Randbedingungen sowohl technische Voraussetzungen und Forderungen für eine Anwendung als auch biologische Voraussetzungen, überwiegend in der Andersartigkeit der Biologie als Disziplin begründet, zu subsumieren sind. Daher sind beide im Folgenden nochmals zusammengefasst.

### 5.1.1 Technische Voraussetzungen und Forderungen an eine bionische Methode

Der Wunsch nach einer Innovation<sup>1</sup>, also einer technisch neuartigen oder allgemeiner gesagt, einer besonderen Lösung für ein technisches Problem initiiert die Suche nach unbekanntem biologischen Phänomenen und deren wirkenden Effekten. Denn eine einfache Übernahme bekannter technischer Lösungen minimiert den nicht zuletzt medienwirksamen Innovationscharakter einer „Symbiose aus Biologie und Technik“ dramatisch. Dies setzt natürlich voraus, dass technische Lösungen überhaupt existieren.

Zu dieser Suche existiert eine bestimmte, in der Regel sehr spezifische Problemstellung, die sich zwar abstrakt funktional mittels Substantiv und Verb beschreiben lässt, für eine erfolgreiche Suche durchaus einer Konkretisierung mit Eigenschaften bedarf.

Eine Hauptforderung an die Bionik ist, wie an jede Methode, ein hoher Wirkungsgrad. Eine Methode wird nur dann wiederholt angewendet werden, wenn der Nutzen den investierten Aufwand rechtfertigt. Da bei der Bionik nicht von vornherein garantiert werden kann, dass ein adäquates biologisches Phänomen zu der vorliegenden Problemstellung gefunden werden kann, ist der Such-, Bewertungs- und Entscheidungsprozess diesbezüglich zu verbessern. Der Aufwand bis zu einer Feststellung, ob ein potenziell geeignetes Phänomen existiert, möglichst gering zu halten. Die dafür notwendige Information ist daher möglichst frühzeitig zu generieren. Die Bionik in Form einer Angewandten Bionik muss schließlich für einen Entwickler möglich sein, dessen Grundwissen über biologische Systeme und dessen zur Problemlösung zur Verfügung stehende Zeit eingeschränkt sind. Dabei sollte er möglichst auch nur die unmittelbar vorhandene und von ihm zugreifbare biologische Information verwenden müssen.

### 5.1.2 Biologische Randbedingungen

Biologische Phänomene sind jeweils eine von außen erkennbare Besonderheit eines Systems, die auf einem, häufiger jedoch auf vielen vernetzten Elementen und Effekten beruhen. Die Systeme selbst sind biologisch taxonomiert, ihre Elemente und die dadurch erfüllten Effekte sind unter technischen Aspekten oder für eine technische Umsetzung üblicherweise nicht oder kaum betrachtet worden. In einschlägiger Literatur oder im Internet lässt sich zu bestimmten Effekten dieser Systeme gewöhnlich kaum spezifische Information finden, zu dem System selbst eine große Menge allgemeiner Information, die mitunter auch Allgemeines zu diesem Effekt enthält. Aus dieser Flut, gewöhnlich in Prosa vorliegender Angaben, können durch technische Interpretation relevante Zusammenhänge abgeleitet werden. In diesem Fall, wie

---

<sup>1</sup> Innovation (lat.: innovatio) - ursprüngliche Bedeutung: „etwas neu Geschaffenes“. Damit ist jedoch nicht nur die Erfindung selbst gemeint, sondern auch deren marktwirtschaftliche Verwertung.

auch wenn die Systeme oder deren Teile schon technisch analysiert wurden, müssen die Zusammenhänge gedeutet und überprüft werden, da die Güte dieser Information nicht ausnahmslos hoch ist.

Eine Recherche über eine abstrakte, funktionale Beschreibung mittels Substantiv und Verb führt meist nicht oder nur eingeschränkt zu einem passenden Phänomen. Für einige technische Funktionen existieren darüber hinaus auch keine biologischen Pendanten. Eine analoge Betrachtung ist dann nur entsprechend abstrahiert möglich.

## **5.2 Das Hilfsmittel Charakterisierende Beschreibung**

Die Charakterisierende Beschreibung stellt ein methodisches Hilfsmittel für die Suche und Analyse biologischer Phänomene bezüglich technischer Funktionen dar. Es berücksichtigt die technischen Voraussetzungen und biologischen Randbedingungen und unterstützt den Entwickler, geeignete Phänomene für eine bestimmte technisch zu lösende Problemstellung zu finden und frühzeitig auszuwählen. Die Entwicklung dieses Hilfsmittels basiert auf Erkenntnissen bei der Lösungssuche mit Hilfe der Biologie, welche in Projekten mit Entwicklern aus Unternehmen sowie in Fallstudien am Lehrstuhl für Produktentwicklung festgestellt werden konnten. Es lässt sich ohne Aufwand in das Bionische Vorgehensmodell integrieren.

### **5.2.1 Die Grundgedanken der Charakterisierenden Beschreibung**

Das Hilfsmittel der Charakterisierenden Beschreibung soll den Entwickler bei einer angewandten Bionik unterstützen. Das bedeutet eine Unterstützung von Nicht-Biologen bei der Suche und der Analyse biologischer Phänomene hinsichtlich der Umsetzbarkeit dieses Phänomens oder seiner wirkenden Effekte als Lösung für ein technisches Problem. Im Folgenden sind die einzelnen Schritte der Charakterisierenden Beschreibung kurz erklärt:

Der Beginn bei dieser angewandten Bionik ist nicht, wie bei der allgemeinen Bionik üblich, ein biologisches Phänomen, sondern ein vorliegendes konkretes technisches Problem. Der Einstieg in eine Suche stellt eine Systemmodellierung und somit eine abstrakte Problemformulierung dar, das heißt eine Beschreibung einer Funktion als Verb, besser jedoch als Substantiv und Verb. Prägnante Zielformulierungen können in dieser Situation zusätzlich die Qualität möglicher Lösungsansätze steigern [LINDEMANN ET AL. 2001].

Bei der spontanen Lösungssuche lassen sich über eine so nicht näher spezifizierte technische Funktion verschiedene biologische Phänomene finden. Meist können schon im Gedächtnis gespeicherte Lösungsinhalte genutzt und notiert werden [EHRENSPIEL 2004 S. 361]. Unterschiedliche methodische Hilfsmittel, wie Lösungskataloge [HILL 1997], Assoziationslisten

[GRAMANN 2004] allgemeine Literatur der Biologie sowie das Internet können hierbei den Entwickler sinnvoll unterstützen.

Die „Aufgabe der Problemlösung ist das Herausschälen der wesentlichen Informationen zum Problem und damit die Zahl der Möglichkeiten auf wenige, wenn möglich eine einzuschränken“ [RUTZ 1985 S. 53]. Vorhandene qualitative, biologisch basierte Information über die hinter den Phänomenen stehenden Systeme lässt sich nutzen, um eine frühzeitige Analyse und Auswahl geeigneter Systeme zu ermöglichen. Diese abstrakte Analyse gefundener Systeme soll dabei nicht verhindert, sondern bewusst gefördert werden. Analyseergebnisse wiederum können helfen, eine wiederholte und deutlich stärker zielgerichtete Suche nach biologischen Systemen zu starten (Iteration im Bild nicht dargestellt).

Über die Analyseergebnisse lässt sich die zu erfüllende technische Funktion ebenfalls besser spezifizieren und somit die grundsätzlich vorhandene Kluft zwischen den beiden Disziplinen deutlich verringern. Dadurch lassen sich frühzeitig nur scheinbar passende Phänomene aussondern, Phänomene mit hoher Affinität zum technischen Problem leichter finden und bevorzugt einer intensiven Analyse unterzogen werden. Lassen sich keine passenden oder nur schlecht passende Phänomene finden, so wird eine iterative Suche nach geeigneten Phänomenen durch die nun bereits ausgeführte Spezifizierung der Suchfunktion insofern unterstützt, dass nun zielgerichtet gesucht werden kann.

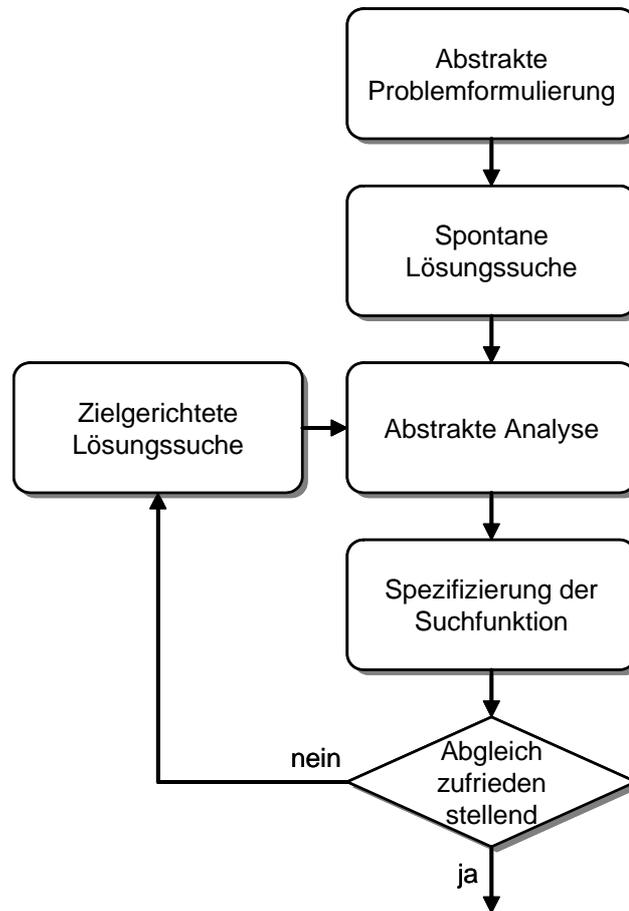


Abb. 5-1: Grundsätzliches Vorgehen der Charakterisierenden Beschreibung

Diese Grundgedanken werden in den nachfolgend beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten genauer spezifiziert.

### 5.2.2 Charakterisierende Beschreibung zur abstrakten Analyse biologischer Phänomene

Für eine frühzeitige Auswahl auf eine technische Problemstellung passende biologische Phänomene lassen sich allgemeine, meist in Prosa vorliegende biologisch geprägte Beschreibungen effektiv nutzen. Die über eine technische Funktion gesuchten und spontan oder mittels geeigneter Hilfsmittel entdeckten Phänomene können nicht gesamt über eine intensive Analyse auf ihre Funktionsweise und mögliche Effekte hin untersucht werden. Hierzu fehlen den Entwicklern häufig Zeit, Wissen sowie notwendige Ressourcen. Eine abstrakte Analyse und Auswahl und damit die Fokussierung auf wirklich geeignete Phänomene ist daher anzustreben.

Dazu sind die biologischen Systeme bezüglich ihrer Phänomene mit bestimmenden Merkmalen, den Parametern zu beschreiben. Diese Parameter bezeichnen charakterisierende Attribute, wie „Zeit“, „Länge“, „Kraft“, „Ort“ etc. und beziehen sich jeweils auf bestimmte Objekte. Das können beispielsweise Elemente des biologischen Systems, z. B. „Flügel“ wie auch deren Aktionen, z. B. „Flügelschlag“ sein. Parameter und Objekt besitzen jeweils einen Attributwert, das heißt eine bestimmte Ausprägung, die in dieser frühen Phase und mit der zur Verfügung stehenden Information üblicherweise nicht quantitativ formuliert werden kann. Demzufolge können die Phänomene nur qualitativ, das bedeutet mittels Adjektiven beschrieben werden. So lässt sich der „Kraft“ des „Flügelschlags“ beispielsweise die Ausprägungen „groß“, „klein“ oder „mittel“ zuordnen. Die jeweilige Zuordnung der Ausprägung steht dabei immer in Relation zu den übrigen, ebenfalls im ersten Anlauf gefundenen Phänomenen. Existieren für das genannte Beispiel als weitere Phänomene neben dem Flügelschlag eines Kolibris, der einer Libelle und die Flossenbewegung eines Mantas, so lässt sich die „Kraft“ in der Reihenfolge „gering – sehr gering – groß“ zuordnen. Mit den jeweiligen Kombinationen aus Parameter, Objekt und Ausprägung werden die Eigenschaften der einzelnen Phänomene ausreichend beschrieben, um das Ziel einer in dieser Phase möglichen, umfangreichen Charakterisierung der Phänomene zu erreichen. Das bedeutet eine sehr frühzeitige Analyse und somit die Möglichkeit zur Abgrenzung der Phänomene zueinander.

Zur Auswahl passender und schließlich mit höherem Aufwand zu analysierender Phänomene muss ein Abgleich dieser mit der Suchfunktion stattfinden. Dazu ist die Suchfunktion mittels der zur Charakterisierung der Phänomene verwendeten Parameter und Ausprägungen zu spezifizieren, bevor dieser Abgleich durchgeführt werden kann. Schließlich ergibt sich so Ressourcen schonend und dennoch effektiv eine Rangordnung der gefundenen und auf abstrakter Ebene analysierten Phänomene. Eines oder mehrere der Phänomene mit der höchsten Übereinstimmung mit der bereits spezifizierten Suchfunktion können nun ausgewählt und im Folgenden einer intensiven Analyse unterzogen werden.

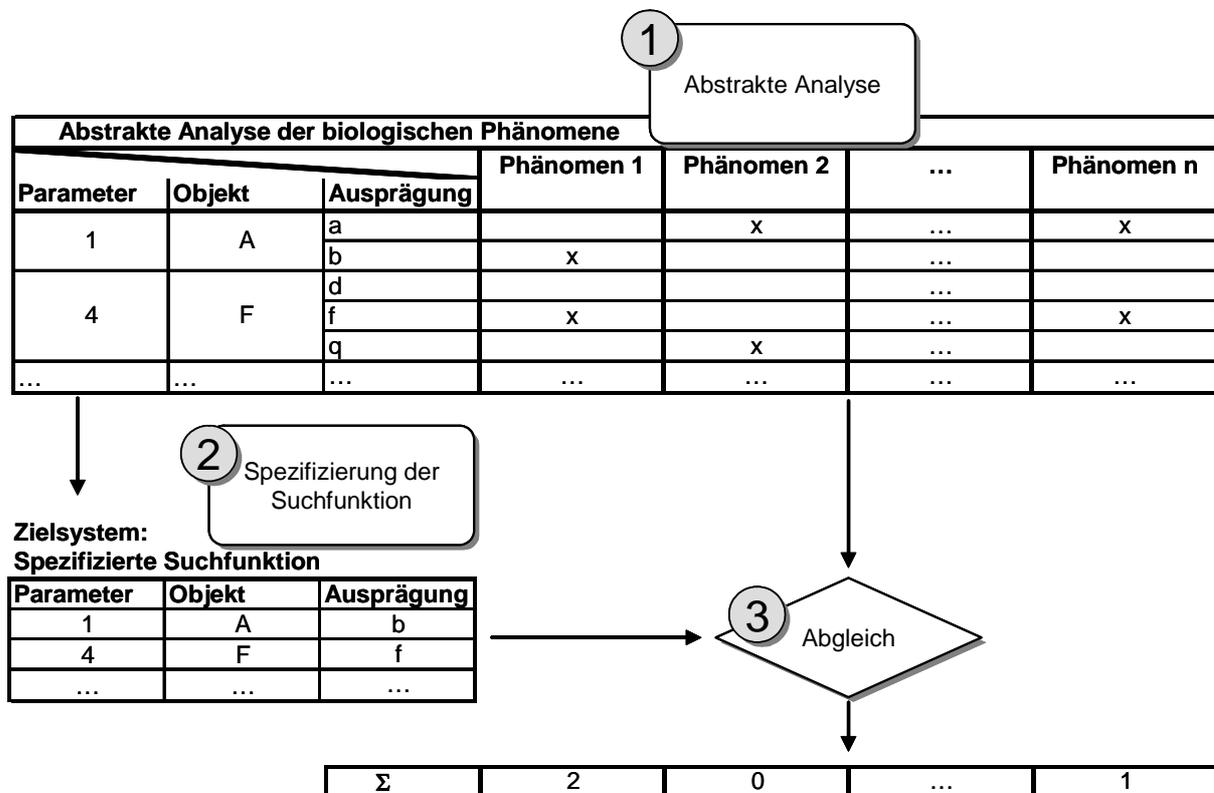


Abb. 5-2: Ablauf der abstrakten Analyse mittels Charakterisierender Beschreibung

Zur Vertiefung soll die Charakterisierende Beschreibung zur abstrakten Analyse hier an dem bereits vorgestellten Fallbeispiel des Flohsprungs angewendet werden:

## Problemformulierung

In dem folgenden, zur Erläuterung der Charakterisierenden Beschreibung nun exemplarisch herangezogenen Fallbeispiel, soll nun für eine technische Problemstellung eine Lösung über ein biologisches System gefunden werden. Bei dem vorliegenden technischen Problem handelt es sich um eine Druckgasflasche, welche am Kopfende mit einer Membran verschlossen ist. Diese muss in bestimmten Situationen jedoch mithilfe eines Schlagbolzens schnell und sicher durchstoßen und die Flasche damit geöffnet werden, damit die Druckluft entweichen kann. Der Schlagbolzen muss somit eine Beschleunigung erfahren und deshalb mit einer Kraft beaufschlagt werden, welche genügt, dass der Bolzen die Membran durchschlägt. Die Kraft muss autark im System gespeichert sein oder innerhalb kürzester Zeit erzeugt werden können. Damit wird die Suchfunktion mit dem Substantiv und Verb „Kraft erzeugen“ formuliert.

## Spontane Lösungssuche

Eine erste spontane Lösungssuche ergibt die verschiedenen biologischen Phänomene:

- Venusfliegenfalle
- Flohsprung
- Heuschreckensprung
- Muskel
- Vogelflügel
- Würgeschlange

Der Fangapparat der Venusfliegenfalle (*Dionaea muscipula*) besteht aus einer besonderen Blattkonstruktion, die es möglich macht, zwei Blatthälften bei Reizung zusammenzuklappen und so Insekten zu fangen, die anschließend verdaut werden. Dieses Phänomen gehört zu den schnellsten Bewegungen im Pflanzenreich und ist allerdings noch nicht ganzheitlich erforscht. Neueste Erkenntnisse gehen davon aus, dass die Blätter unter Spannung stehen und bei Reizung durch eine geringe Bewegung im Blatt umklappen, wie das Kinderblechspielzeug des springenden Frosches aus Federblech.

Das Sprungvermögen des Flohs (*Siphonaptera*) ist ein weiteres Phänomen. Wie bereits beschrieben erreichen Flöhe trotz ihrer Größe von nur wenigen Millimetern Sprunghöhen von mehreren Zentimetern bis zu einigen Dezimetern. Die Schnellbewegung der Sprungbeine gilt ebenfalls als eine der schnellsten Bewegungen im Tierreich.

Ein anderes Prinzip der Sprungbewegung vermutet man bei der Heuschrecke. Ihre Anatomie unterscheidet sich schließlich deutlich von der des Flohs. Bei Lang- und Kurzfühlerheuschrecken ist das Hinterbeinpaar zu zwei sehr kräftigen, langen Sprungbeinen ausgebildet, daher werden diese beiden Ordnungen häufig auch zu einer Ordnung der Springschrecken (*Saltatoria*) zusammengefasst. Bei genauerer Betrachtung lassen sich bei Heuschrecken besonders gestaltete Gelenke feststellen, die über eine spezielle Übersetzung eine optimale Kraftübertragung ermöglichen.

Über die Suchfunktion „Kraft erzeugen“ stößt man auch auf Würgeschlangen. Durch Umschlingung erstickt sie ihre Beute, bevor sie sie im Ganzen verschluckt. Dabei zieht die Schlange ihre Umschlingung jedes Mal enger, wenn die Beutetiere ausatmen. Die Kraft, mit der die Schlangen dabei zudrücken können, ist mehr als beeindruckend.

Muskeln (*musculus*) selbst sind Phänomene, die in der Natur zur Anwendung kommen, um Kräfte zu erzeugen. Dabei existieren unterschiedlichste Formen und Anwendungsbereiche dieser aus einzelnen Fasern bestehenden Organe. Muskeln können dabei nur eine kontrahierende Bewegung ausführen und benötigen so Gegenmuskeln oder andere Hilfsmittel, wie

Bänder oder Flüssigkeitsdrücke, um die Ausgangslage wiederzuerhalten. Angesteuert werden Muskeln durch elektrische Signale über Nervenzellen, die die Muskelkontraktion und damit das Ineinanderschieben der Myofibrillen initiieren.

Die Form der Flügel von Vögeln erzeugen bei Umströmung mit Fluiden Auftriebskräfte, die eine hoch effiziente Fortbewegung dieser Tiere erlauben. Streng genommen entsteht das Phänomen durch die Kombination aus dem Systemelement Flügel mit der Systemumgebung, der Strömung eines Fluides.

Diese sechs zur Suchfunktion „Kraft erzeugen“ gefundenen und hier beschriebenen Phänomene und potenziellen Lösungsansätze für das vorliegende technische Problem stellen nicht näher analysierte biologische Erscheinungen dar, die allerdings innerhalb weniger Minuten ohne besondere Hilfsmittel gefunden werden konnten. Sie machen jedoch deutlich, wie unterschiedlich sich ein Lösungsfeld darstellen kann. Die Phänomene können Systeme, Systemelemente oder Verhaltensweisen auf unterschiedlichen Ebenen beschreiben. Die Relevanz für die Problemlösung ist demzufolge mehr oder weniger groß, was bei dem vorhandenen Detaillierungs- und Beschreibungsgrad nicht unbedingt einfach festzustellen ist.

### **Abstrakte Analyse durch Charakterisierende Beschreibung**

Jeder dieser Lösungsvorschläge erfordert zur genauen Analyse der Ursachen und Wirkungen der Phänomene einen jeweils unterschiedlichen aber überwiegend hohen Aufwand. Daher ist anzustreben, mit dem Grundwissen des Entwicklers oder des Entwicklungsteams sowie unmittelbar und schnell verfügbarer Information auf abstrakter Ebene eine begründete und sinnvolle Fokussierung auf wenige aber überzeugende Phänomene zu erreichen.

Dies wird über die Charakterisierende Beschreibung ermöglicht. Zur qualitativen Beschreibung eines Phänomens hinsichtlich der Suchfunktion werden die notwendigen Parameter notiert, üblicherweise mit dem zugehörigen Objekt detailliert und mit einer Ausprägung beschrieben.

Für das erste Phänomen *Dionaea muscipula* ergibt sich damit die folgende Klassifizierung:

**Abstrakte Analyse der biologischen Phänomene**

Parameter	Objekt	Ausprägung	Dionea muscipula
Verlauf	Gesamtsystem	impulsartig	x
		kontinuierlich	
		wellenförmig	
Geschwindigkeit	Bewegung	langsam	
		mittel	x
		schnell	
Dauer	Wirkung der Kraft	kurz dauernd	
		lang haltend	x
Verlauf	Beschleunigung	progressiv	
		degressiv	
		linear	x
Größe	Kraft	groß	
		klein	x

Abb. 5-3: Klassifizierung des Phänomens *Dionaea muscipula*

Für eine abstrakte Beschreibung bezüglich der gesuchten Funktion „Kraft erzeugen“ relevante Parameter sind vor allem von der Kraft selbst und ihrem zeitlichen Verhalten geprägt. Zur Krafterzeugung stellt sich die Frage nach der Größe, beim zeitlichen Verhalten die Reaktionszeit des gesamten Systems, der zeitliche Verlauf der Beschleunigung, die Geschwindigkeit der Bewegung sowie die Dauer der wirkenden Kraft. Die Venusfliegenfalle zeichnet sich diesbezüglich durch ein impulsartiges Gesamtverhalten mit einer wahrscheinlich linearen Kraftentfaltung einer mittleren Geschwindigkeit aus, die lang anhaltend auftritt und eher kleiner Größe ist.

Ebenso werden die übrigen Phänomene mit den gleichen Parametern zu beschreiben versucht. Die Erstellung der Beschreibung erscheint unter Umständen auf den ersten Blick und von außen betrachtet schwierig. Die praktische Anwendung bestätigt hingegen das Gegenteil. Anwender kommen mit der Beschreibung eines Sachverhaltes unmittelbar zurecht. Durch die wiederholte Auseinandersetzung mit der Suchfunktion, den Parametern und den Ausprägungen bei der Beschreibung eines jeden Phänomens werden mitunter weitere bisher vergessene Parameter aufgedeckt, die zur abstrakten Beschreibung relevant sind. So wird über die Charakterisierung des Flohs ein weiterer Parameter, der Kraftangriffspunkt eingeführt. Somit finden sich in dem Vorgang der Charakterisierenden Beschreibung Prüfschritte, die zur Steigerung der Schärfe aus der Analyse abgeleiteter Aussagen und damit zur Steigerung der Genauigkeit der Analyse selbst beitragen können. Schließlich ergibt sich eine Matrix, in deren Spalten die Phänomene und in den Zeilen die Parameter, die zugehörigen Objekte sowie die unterschiedlichen Ausprägungen aufgetragen sind. In den Schnittpunkten werden Zuordnungen

entsprechend markiert und die Phänomene zueinander bewertet. Fehlt eine Information, so muss das entsprechende Feld leer bleiben. Der Vorgang der abstrakten Analyse mittels der Charakterisierenden Beschreibung erfüllt bei der Arbeit im Team darüber hinaus den Anspruch an die Generierung eines gemeinsamen Modells für die Problemstellung und jedes einzelnen Systems.

**Abstrakte Analyse der biologischen Phänomene**

Parameter	Objekt	Ausprägung	Dionea	Floh	Heuschrecke	Muskel	Flügel	Würgeschlange
			muscipula					
Verlauf	Gesamtsystem	impulsartig	x	x	x	x		
		kontinuierlich				x	x	x
		wellenförmig						
Geschwindigkeit	Bewegung	langsam					x	x
		mittel	x		x	x		
		schnell		x				
Dauer	Wirkung der Kraft	kurz dauernd		x	x	x		
		lang haltend	x			x	x	x
Verlauf	Beschleunigung	progressiv						x
		degressiv		x	x			
		linear	x			x		
Größe	Kraft	groß				x	x	x
		klein	x	x	x			
Angriff	Kraft	zentral		x	x	x		
		verteilt	x				x	x

Abb. 5-4: Matrix charakterisierter Phänomene

## Spezifizierung der Suchfunktion

In diesem nächsten Schritt werden die Parameter der gefundenen Lösungen zur Spezifizierung der Suchfunktion genutzt. Die zur Charakterisierung der gefundenen Phänomene erstellten Parameter werden auf die Suchfunktion übertragen und sofern möglich, mit den ebenfalls bereits verwendeten Ausprägungen beschrieben. Gegebenenfalls müssen dabei neue Attribute vergeben oder Parameter erzeugt werden. Dieses Vorgehen stellt seinerseits wieder einen Prüfschritt für die Charakterisierung der Phänomene dar. In dem gegebenen Beispiel wird die Funktion „Kraft erzeugen“ wie folgt näher spezifiziert.

**Spezifizierung der Suchfunktion**

Parameter	Objekt	Ausprägung
Verlauf	Gesamtsystem	impulsartig
Geschwindigkeit	Bewegung	schnell
Dauer	Wirkung der Kraft	kurz dauernd
Verlauf	Beschleunigung	degressiv
Größe	Kraft	groß
Angriff	Kraft	zentral

Abb. 5-5: Spezifizierung der Suchfunktion "Kraft erzeugen"

Die Spezifizierung der technischen Funktion mittels Parametern und Adjektiven, die zur Beschreibung biologischer Phänomene dienen, ermöglicht es, die üblicherweise vorhandene Trennung zwischen der Biologie einerseits und der Technik andererseits zu reduzieren und führt somit zur Möglichkeit eines bewertenden Vergleichs. Unter Umständen werden bei der Spezifizierung der Suchfunktion weitere Parameter und Adjektive festgestellt, was wiederum zur Verbesserung der Charakterisierung der biologischen Phänomene genutzt werden kann.

### Abgleich und Bestimmung der Übereinstimmung

Als Ergebnis der vorangegangenen Schritte können die Phänomene nun mit der spezifizierten technischen Suchfunktion verglichen und bezüglich dieser sowie zueinander bewertet werden. Das oder die Phänomene, die den höchsten Übereinstimmungsgrad mit der zu erfüllenden Funktion besitzen, können ausgewählt und anschließend einer detaillierten und intensiven Analyse unterzogen werden. Im vorliegenden Fall zeigt der Flohsprung in den meisten Parametern eine Übereinstimmung mit der Problemstellung und scheint so prädestiniert für eine Auswahl.

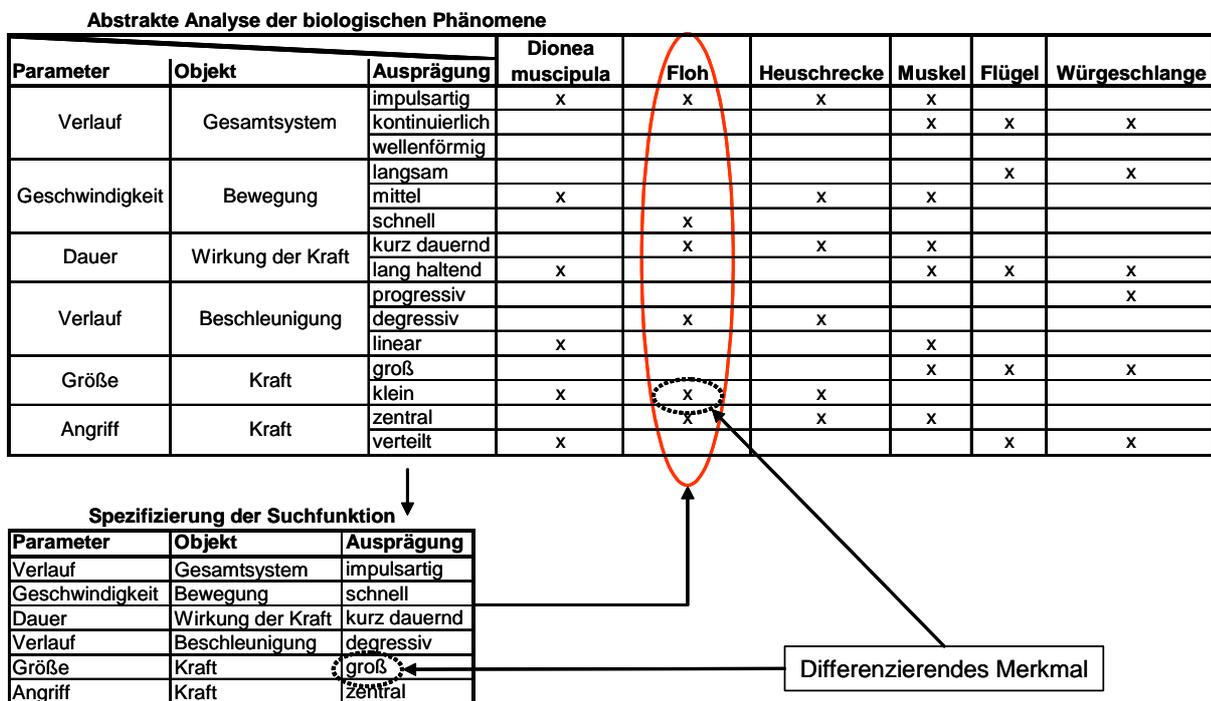


Abb. 5-6: Abgleich und Auswahl geeigneter Systeme

Ein weiterer wichtiger Punkt ist bei diesem Vorgehen festzustellen. Durch die Überprüfung der Übereinstimmung relevanter Parameter lassen sich schnell differenzierende Merkmale

feststellen und Handlungsmaßnahmen sowie Analyseschwerpunkte ableiten. Im vorgestellten Beispiel findet sich ein Unterschied in der Größe der Kraft zwischen der gesuchten Funktion und dem ausgewählten Phänomen des Flohsprungs, da der Floh nur eine geringe absolute Kraft erzeugt. Somit ergibt sich für den Entwickler eine Skalierungsaufgabe des Phänomens des Flohsprungs.

Ein Vorteil dieser Art des Vorgehens ist, dass für eine technische Problemstellung ein spezifischer Katalog an Lösungsalternativen erstellt wird. So lassen sich möglicherweise einzelne Effekte eines anderen Phänomens mit einem bereits ausgewählten Phänomen schnell kombinieren und so die Wahrscheinlichkeit einer technischen Umsetzbarkeit erhöhen. Auch für den Fall, dass die technische Umsetzung eines biologischen Phänomens wider Erwarten nicht funktioniert, kann in die Charakterisierungsmatrix zurückgesprungen werden und schnell ein alternatives Phänomen gewählt werden, welches bereits abstrakt analysiert worden ist. Diese Möglichkeiten unterstützen eine industrielle Anwendbarkeit, da Prozesse, monetär bewertet, effizient sein sollten. Eine weitere sinnvolle Möglichkeit zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung sowie zur Vermeidung von Denk- und Handlungsfehlern ist es, statt als Einzelperson, die Bearbeitung des technischen Problems über die Analogiebetrachtung in der Biologie im Team durchzuführen. Bereits ab zwei Personen kann so ein größerer gemeinsamer Wissensspeicher genutzt werden und Kontrollmechanismen über ein diskursives Vorgehen integriert werden [WULF 2001 S. 77 ff].

### **5.2.3 Charakterisierende Beschreibung zur zielgerichteten Lösungssuche**

Nun kann es durchaus vorkommen, dass nach der Durchführung einer abstrakten Analyse und dem Abgleich mit der Suchfunktion kein passendes biologisches Phänomen vorhanden ist. Dabei ist zuallererst positiv zu bewerten, dass dadurch nicht fälschlicherweise ein schlecht passendes biologisches Phänomen oder dessen Effekte langwierig analysiert und versucht wird, als Lösung für das vorliegende Problem technisch zu übertragen.

Dem Entwickler ist damit für die Generierung einer Lösung für sein Problem zwar vorerst nicht geholfen, allerdings hilft die Spezifizierung der Suchfunktion bei einer iterativen Suche nach Phänomenen. Bereits bei der Spezifizierung selbst lässt sich feststellen, dass durch die Analyse und der Charakterisierenden Beschreibung der Funktion weitere Phänomene gefunden beziehungsweise Suchrichtungen formuliert (z.B.: „Welches natürliche System nutzt oder verwendet eine Kraft impulsartig?“) und aufgezeigt werden. Durch die Spezifizierung der Suchfunktion und eine geschickte Formulierung von Suchfragen in Form abstrakter Zielformulierungen [Wulf 2001] („Finde ein ...“) lässt sich so eine zielgerichtete Suche nach Phänomenen zur Lösung technischer Probleme unterstützen.

Mitunter kann es natürlich vorkommen, dass spontan kein Phänomen zu einem technischen Problem gefunden wird. In diesem Fall können mangels Phänomene, die abstrakt analysiert und charakterisierend beschrieben werden, erst mal keine Parameter und Ausprägungen für eine Spezifizierung der Suchfunktion verwendet werden.

Aus diesem Grund wurde eine Liste häufig vorkommender Parameter und Ausprägungen erstellt. Basis für diese Zusammenstellung bildet die Assoziationsliste nach Gramann.

Bereiche	Parameter	Ausprägung
<b>Zeit</b>	Dauer	kurz lang (Sekunden)
	Frequenz	hoch niedrig (Hertz)
	Geschwindigkeit	schnell langsam (cm/s)
	Reaktionszeit	schnell langsam (Sekunden)
	Verlauf	progressiv degressiv linear impulsartig kontinuierlich wellenförmig
<b>Kraft</b>	Angriff	zentral verteilt
	Beschleunigung	schwach stark
		...

Abb. 5-7: Liste häufig vorkommender Parameter zur zielgerichteten Suche nach Phänomenen (Ausschnitt)

Mithilfe dieser Liste lassen sich Parameter finden, mit denen sowohl Phänomene zu charakterisieren, wie auch technische Funktionen näher zu spezifizieren sind. Es bleibt dem Entwickler dann nicht erspart, die einzelnen Parameter der Liste einzeln zu betrachten und zu überprüfen.

fen, ob sie jeweils für eine Spezifizierung seines Problems verwendbar sind. Die gesamte Liste findet sich im Anhang.

Weil die Voraussetzungen in der Biologie und der Technik sehr verschieden sein können, ist nicht grundsätzlich davon auszugehen, dass die Anwendung dieses methodischen Vorgehens zwangsläufig zu einem positiven Ergebnis führen wird. Eine Garantie für einen Erfolg kann allerdings keine Methode leisten. Hier spielt die Erfahrung mit Methoden und deren Anwendung eine entscheidende Rolle. Das Hilfsmittel der Charakterisierenden Beschreibung ermöglicht besonders auch relativ unerfahrenen Entwicklern frühzeitig die Entscheidung über die Lösbarkeit eines technischen Problems mithilfe der Betrachtung biologischer Phänomene. Damit können Denk- und Handlungsfehler deutlich reduziert, häufig sogar vermieden werden.

#### 5.2.4 Diskussion

Die Charakterisierende Beschreibung verringert die aufgrund des interdisziplinären Charakters zweier beteiligter Fachdisziplinen herrschenden Schwierigkeiten [BIRKHOFER ET AL. 2004] bei einem angewandten bionischen Vorgehen mit bestehenden Vorgehensmodellen. Damit ermöglicht sie dem Entwickler einen methodisch unterstützten einfacheren Zugang zur Biologie. Denn es stellt ein schnell zu erlernendes und anzuwendendes sowie unkompliziertes Hilfsmittel dar, welches trotz geringer vorhandener Information zu biologischen Systemen eine Analyse und Auswahl sowie eine zielgerichtete Suche biologischer Phänomene ermöglicht. Das Vorgehen ist dabei bewusst einfach gehalten. Es basiert auf der absichtlichen fallspezifischen Erstellung und Zuordnung relevanter qualitativer, meist in Prosa vorliegender Parameter und Attribute zur Analyse. Auf diese Art des Vorgehens kann die vorhandene zur Charakterisierung geeignete Information verwendet werden und so ein Höchstmaß an individueller Problemlösung ermöglicht werden. Eine Liste häufig verwendeter Parameter bietet zusätzlich auch die Möglichkeit zur zielgerichteten Suche ohne vorangegangene Analyse biologischer Phänomene, falls in erster Instanz keine Phänomene zu finden sind.

Letztendlich kann es auch in der Anwendung dieses methodischen Hilfsmittels zu Fehlern kommen, deren Ursachen in den genannten Denk- und Handlungsvorgängen zu finden sind. Trotz effektiver Nutzung der vorhandenen Information kann es durch das Ausblenden wichtiger Inhalte durch Abstraktion oder durch Wissensmangel zu Fehldeuten, Fehlschließen und Fehlentscheiden kommen. Aufgrund eines ungenügenden Wissensstandes kann es so zu Vorgängen, wie einer ungenügenden Modellbildung kommen, etwa verbunden mit einer Zentralreduktion, Nichtbeachtung der Dynamik von Prozessen etc. [DETJE 1996, DÖRNER 2004, STROHSCHNEIDER ET AL. 1987]. Durch fehlende Reflexion, also einer kritischen Kontrolle und Hinterfragen der ausgewählten Phänomene und deren Effekte, kann dies alles dazu führen, dass es im späteren Verlauf des Problemlöseprozesses zu weiteren Problemen kommt. Daher

sollten nach der abstrakten Analyse der Phänomene Kontrollschritte durchgeführt werden, um schon während der Anwendung zu erkennen, ob die Modellierungen der gewählten Systeme eine Plausibilität aufweisen. Erfahrungen in Fallstudien ließen zusätzlich erkennen, dass eine solche Plausibilitätsprüfung überaus erfolgreich in Kleingruppen durchgeführt werden kann. Findet sich kein oder keine Diskussionspartner, so können fachspezifische Diskussionsforen im Internet durchaus eine Unterstützung darstellen,

Trotz intensiver, bewusst Fehler bei der Anwendung vermeidenden Erstellung des methodischen Hilfsmittels der Charakterisierenden Beschreibung kann es dennoch zu Denk- und Handlungsfehlern kommen. Dies liegt darin begründet, dass Methoden, so speziell sie auch sein mögen, eine gewisse Abstraktheit besitzen müssen, um eine Anwendbarkeit für eine möglichst hohe Zahl an ähnlichen Problemstellungen zu gewährleisten. Somit besitzt die Charakterisierende Beschreibung folgende kritische Stellen bei der Ausführung der einzelnen Schritte:

So ist die Formulierung der Suchfunktion sorgfältig zu gestalten, da die Güte der gefundenen Lösungen von der Genauigkeit der Formulierung bei der Beschreibung der Funktion abhängt. Die Erstellung einer abstrakten [LINDEMANN ET AL. 2001] beziehungsweise objektorientierten Zielformulierung [GRAMANN 2004 S. 100] kann helfen eine problemadäquate Suche und Lösungsfeld zu erhalten. Auch die Spezifizierung der Suchfunktion mittels der Liste häufig verwendeter Parameter kann zur Unterstützung herangezogen werden.

Eine Gefahr, die Ursache des Scheiterns einer Anwendung dieser Methode sein kann, ist trotz allem der Wissensmangel. Obwohl die Charakterisierende Beschreibung genau dieses Fehlerpotenzial einer angewandten Bionik drastisch reduziert, bleibt ein Restrisiko bestehen. Fehlt nämlich bestimmte Information über ein Phänomen, so kann das abgeleitete Modell unter Umständen eine nur scheinbare Übereinstimmung mit dem vorliegenden Problem besitzen. Vorhandene und über Recherche ermittelbare Information, aus der Bausteine für ein Wissenskonstrukt generiert.

### 5.3 Fallbeispiele

Das vorgestellte Hilfsmittel der Charakterisierenden Beschreibung wurde in Fallstudien kritisch erprobt und reflektiert. Diese wurden zum einen innerhalb eines Projektes mit einem Hersteller für Bodenpflegegeräte zum anderen zumindest in engem Kontakt mit einem Hersteller für Einspritzdüsen für Verbrennungskraftmaschinen durchgeführt. Innerhalb der Arbeiten wurde zur zielgerichteten Suche nach biologischen Phänomenen und zur abstrakten Analyse dieser Phänomene und deren wirkender Effekte das methodische Hilfsmittel der Charakterisierenden Beschreibung verwendet. Im Folgenden werden die Fallbeispiele sowie die Erfahrungen des Einsatzes der Methode zur Validierung dieser vorgestellt.

### 5.3.1 Optimierung eines Düsensystems für Staubsauger

Staubsauger werden seit ihrer Erfindung im vorletzten Jahrhundert, zur Reinigung von Böden eingesetzt. In den letzten Jahren wuchs die Leistungsaufnahme dieser Haushaltskleingeräte auf bis zu 2000 Watt. Dies ist auf eine marktspezifische Entwicklung zurückzuführen, dass Kunden ihre Kaufentscheidung häufig von diesem Kriterium abhängig machen [ERNZER ET AL. 2002]. Die Reinigungsleistung eines solchen Staubsaugers ist allerdings nicht einzig von diesem Kriterium abhängig [ROSEMANN ET AL. 2002]. Die Gestaltung des Saugkanals oder der Düse beispielsweise haben enormen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Mehrkanaldüsen kamen in der Vergangenheit bereits zum Einsatz, wurden dabei jedoch nicht auf die vorliegende Leistung angepasst. Ziel des Projekts war die Entwicklung einer Mehrkanaldüse für Bodenpflegegeräte. Diese sollte auf ein Gerät mit Höchstleistung von 2000 Watt hin ausgelegt werden. Das vorliegende technische Problem sollte mit bionischem Ansatz, das heißt mit der Suche nach analogen biologischen Phänomenen und der technischen Umsetzung der Effekte bearbeitet werden.

Zu Beginn wurde das System Staubsauger über eine relationsorientierte Funktionsmodellierung analysiert. Das Systemelement Düse wurde im Anschluss näher betrachtet und ein theoretisches Modell abgeleitet. Für das Lösen von Schmutzpartikeln wurden relevante Parameter ermittelt und in einer Einflussmatrix bewertet.

Die Lösungssuche über biologische Analogien erfolgte im Anschluss für drei relevante Funktionen, die über die Analyse als kritisch festgestellt wurden:

- Teilchen aufnehmen
- Fluide strömen
- Unterdruck erzeugen

Bei der Suche nach Analogien in der Biologie konnten für die drei Funktionen schnell über eigene Recherche, biologische Lösungskataloge [HILL 1997] und Assoziationsliste [GRAMANN 2004] jeweils bis zu zehn Phänomene gefunden werden.



- Die Form der einzelnen Kanäle ist in drei Dimensionen der Form eines Vogelflügels nachempfunden, um eine effektive und optimale Sauggeschwindigkeit und -druck an jeder Stelle der Kanäle zu erreichen.

Der in Rapid-Prototyping-Verfahren umgesetzte Prototyp soll nun in Versuchen nach DIN EN 60312 die getroffenen Annahmen untermauern. Positive Ergebnisse können schließlich auch zur Effizienzsteigerung weniger saugstarker Bodenpflegegeräte umgesetzt werden.

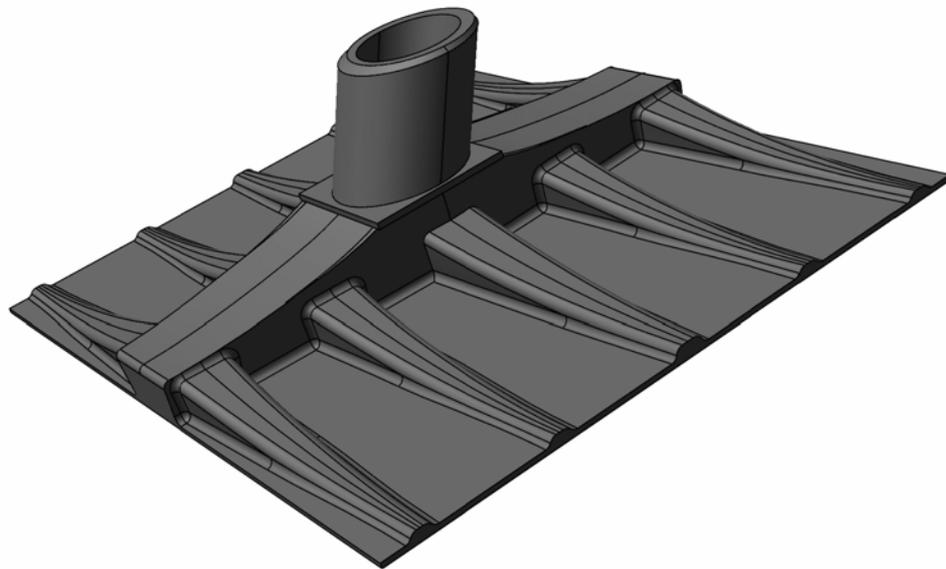


Abb. 5-9: Prototyp einer optimierten Mehrkanaldüse für Bodenpflegegeräte

Als Fazit des Vorgehens in diesem Fallbeispiel kann festgestellt werden, dass eine abstrakte Formulierung eines Suchziels die Anzahl möglicher Lösungen zwar drastisch erhöht, jedoch die Gefahr beinhaltet, auch wenig oder nur auf den ersten Blick relevante Phänomene zu erhalten. Zur Verringerung dieser kritischen Stelle im Ablauf ist es förderlich, eine abstrakte Ziel-/ Problemformulierung zu erstellen und die Suche nach Phänomenen auf Basis der Suchfunktion und Zielformulierung durchzuführen. Die Charakterisierende Beschreibung vermeidet in diesem Fall grundsätzlich zwar nicht das Fehldeuten und Fehlschließen beim Suchen nach Analogien, die frühzeitige Beschäftigung mit den gefundenen Phänomenen und die Möglichkeit der Nutzung qualitativer Information hilft, Fehler frühzeitig zu erkennen und zu

verringern, Analysefragen zu ermitteln und damit die Fokussierung auf Wesentliches zu unterstützen. Diese Aussagen lassen sich durchaus auch auf die abstrakte Analyse und Auswahl der Phänomene übertragen. Bei jeder der drei Teilfunktionen konnten die ergebnisstarke Analyse umgehend ausgeführt und belastbare Entscheidungen schneller getroffen werden, als dies bei einem bionischen Vorgehen ohne Charakterisierende Beschreibung üblich ist.

Die Charakterisierende Beschreibung selbst führte im Vorgehen zu keinen weiteren Schwierigkeiten.

### 5.3.2 Optimierung einer Einspritzdüse für Kraftstoffe

In dem zweiten Fallbeispiel sollte die technische Problemstellung behandelt werden, Fluide optimal zu zerstäuben. Diese für Einspritzsysteme bei Verbrennungsmotoren typische Problemstellung sollte ebenfalls über die Betrachtung und technische Umsetzung biologischer Phänomene bearbeitet werden. Die Analyse des Problems und Ableitung der Suchfunktionen wurde in engem Kontakt mit einer Firma, die Einspritzdüsen für Kraftfahrzeuge entwickelt durchgeführt. Als Besonderheit gegenüber dem Fallbeispiel der Optimierung einer Mehrkanaldüse für Bodenpflegegeräte wurde die Angewandte Bionik in einem Team aus je einer Studentin des Maschinenwesens sowie der Biologie durchgeführt.

Für die vorliegende Problemstellung sollten biologische Phänomene gesucht werden, die in der Lage sind, entweder hohen Druck aufzubauen oder Fluide hinsichtlich der Erreichung einer großen Oberfläche optimal zu zerstäuben beziehungsweise beide Anforderungen erfüllen können. Das Suchziel wurde so formuliert, weil bei der Analyse der Problemstellung bei Einspritzsystemen einerseits die Düsen selbst sowie die Pumpen als Kernelemente und für die Gesamtfunktion hauptsächlich verantwortliche Bauteile erkannt wurden.

Die spontane Lösungssuche über allgemeine biologische Literatur sowie das Internet führte zu acht biologischen Phänomenen, die potenziell für eine technische Umsetzung möglich schienen und so über die Charakterisierende Beschreibung abstrakt analysiert und bewertet wurden. Da zu bestimmten Phänomenen mit dem annehmbaren Aufwand einer abstrakten Analyse nur wenig Information gefunden werden konnte, wurden bei der qualitativen Analyse auch auf Schätzung begründete Zuordnungen zur Bewertung verwendet. Da die Schätzung und damit die Bewertung der Phänomene zueinander und bezüglich der Suchfunktion im Team erfolgte, ist dieses Vorgehen vertretbar. Ausgewählt wurden schließlich die Phänomene „Abwehrmechanismus des Bombardierkäfers“ und „Rückstoßprinzip bestimmter Weichtiere“.

- Der Bombardierkäfer (*Brachinus crepitans* oder *Brachinus explosivus*) besitzt zur Abwehr von Feinden eine Düse am Hinterleib, durch die er die zwei unmittelbar vor dem Schuss vermischten Chemikalien Hydrochinon und Wasserstoffperoxid versprühen kann. Durch das Wirken eines Katalysators wird in einer der Düse vorgelagerten Explosionskammer in

einer exothermen Reaktion Chinon, Sauerstoff und Wasser erzeugt. Durch die entstehende Wärme verdampft das Wasser, unter hohem Druck schießt eine ca. 100°C heiße Gaswolke durch die Düse.

- Die zu den Weichtieren (Mollusca) gehörenden Kopffüßler (Cephalopoda oder Siphonopoda) benutzen zur Fortbewegung ihre Tentakeln oder Flossensäume. Zur Flucht aber können sie Wasser aus der Mantelhöhle durch den Siphon, einer rüsselartigen Verlängerung des Mantelhöhlenausgangs, pressen. Mittels des entstehenden Rückstoßes können sie sich, durch Verstellung des Siphons auch gesteuert, rückwärtig fortbewegen. Kalamare (Loligo) nutzen sogar fast ausnahmslos diese Art der Fortbewegung. Diese Art des Antriebs wird auch Siphonalantrieb genannt.

Die ausgewählten Phänomene konnten im Anschluss für eine technische Umsetzung gezielt genauer analysiert werden. Eine detaillierte Analyse wahrscheinlich nicht umsetzbarer weiterer Phänomene und damit ein erhöhter Zeitaufwand konnte so vermieden werden.

Die Erkenntnisse aus der Anwendung des ersten Fallbeispiels konnten bei dieser Anwendung bestätigt werden. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die abstrakte Analyse über die Charakterisierende Beschreibung bei der interdisziplinären Kommunikation hilfreich sein kann [BIRKHOFER ET AL. 2004]. Technische wie auch biologische Fachbegriffe werden decodiert und in einer gemeinsam verständlichen Sprache für eine Analyse und Bewertung formuliert. Dadurch lässt sich ein gemeinsames Systemverständnis und ein gemeinsames Modell bezüglich des Problems und einer möglichen Lösung ableiten.

## 5.4 Zusammenfassung

Ein methodisches Hilfsmittel für eine industrielle Anwendung eines bionischen Gedankens muss verschiedenen Anforderungen gerecht werden. Eine Methode muss grundsätzlich den Entwickler mit einem hohen Wirkungsgrad unterstützen, schneller oder überhaupt eine richtige Lösung für ein vorliegendes Problem zu bekommen. Die Natur besitzt unbestritten ein hohes Potenzial für innovative Lösungen technischer Problemstellungen, allerdings ist der Zugang für technisch ausgebildete Menschen meist sehr schwierig, sodass die Chance, ein adäquates Phänomen zu finden und technisch zu adaptieren nur in wenigen Fällen funktionieren möchte. Aufgrund von Wissenslücken bei diesem Such- und Übertragungsprozess kommt es ohne methodische Unterstützung leicht zu Fehlern. Aber auch Methoden können unter Umständen zu Denk- und Handlungsfehlern führen. Existierende Vorgehensmodelle besitzen im Bereich der zielorientierten Suche nach biologischen Phänomenen und deren frühzeitigen Analyse im Prozess Schwächen durch mangelnde methodische Unterstützung. Ziel war, ein methodisches Hilfsmittel zu erstellen, welches den Entwickler bei der Suche und Analyse von

biologischen Phänomenen effektiv und effizient unterstützt und dabei besonders dem Generieren von Fehlern im menschlichen Denken und Handeln entgegenwirkt.

Die Charakterisierende Beschreibung erreicht dieses Ziel, indem Sie die Barriere zwischen den Disziplinen Technik und Biologie abbaut. Dem Entwickler ist es damit möglich, die für Phänomene vorliegende biologisch geprägte Information zu nutzen und so frühzeitig im Prozess diese biologischen Phänomene auf ihre Eignung für ein vorliegendes technisches Problem zu überprüfen und die verschiedenen Alternativen zu bewerten. Die weitere Bearbeitung wird gleichzeitig dadurch unterstützt, dass für ausgewählte Phänomene Differenzierungsmerkmale erkannt sind und somit Bearbeitungspunkte herausgestellt sind.

Fehler, die in der bisherigen Durchführung einer Angewandten Bionik an kritischen Stellen entstanden sind, werden durch das methodische Hilfsmittel der Charakterisierenden Beschreibung vermieden beziehungsweise deutlich verringert. Durch einen pragmatisch einfachen Aufbau dieser Methode sowie der bewussten, offenen Auseinandersetzung mit kritischen Stellen im Ablauf können weitere Fehler auch in der Anwendung dieser Methode selbst vermieden und somit der Wirkungsgrad einer Angewandten Bionik erhöht werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

*Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit werden in diesem Kapitel beziehend auf die Ausgangssituation und der abgeleiteten Problemstellung zusammenfassend erörtert. Im Anschluss möchte der Ausblick Anregungen zur weiteren Optimierung der Bionik als Methode im Speziellen und der Methodenanwendung im Allgemeinen geben.*

### 6.1 Zusammenfassung

Erfolgreiches Handeln in der Produktentwicklung ist ein nachvollziehbarer Wunsch nicht nur des unmittelbar betroffenen Entwicklers. Effektive und effiziente Abläufe liegen im Interesse des Unternehmens und der Produktnutzer erwartet schließlich ein Produkt, welches die Erfüllung bestimmter Bedürfnisse sicherstellt.

Der Produktentwicklungsprozess ist durch das Auftreten von Problemen gekennzeichnet, die ein erfolgreiches Handeln gefährden können. Technische Probleme sind dabei nicht selten und eine zufällig auftretende Erscheinung, sondern nicht zuletzt aufgrund der vorherrschenden Komplexität ständiger Begleiter während einer Entwicklung. Probleme ergeben sich, wenn eine Barriere zwischen einem unerwünschten Ausgangs- und einem gewünschten Zielzustand existiert und das Wissen, wie diese Barriere zu überwinden ist, fehlt. Dieser Wissensmangel kann prozeduraler sowie deklarativer Natur sein, also ein Mangel an Prozesswissen bzw. an Faktenwissen darstellen.

Das Lösen von Problemen ist im Gegensatz zu vielen bei der Entwicklung von Produkten automatisiert ablaufenden Handlungen ein überwiegend bewusst ablaufender Prozess auf einer Regel- oder Fähigkeitsbasierten Ebene, in dem das erforderliche Wissen generiert wird. Problemlösen besteht also aus durch Denken geprägter Informationssuche und -verarbeitung zur Generierung dieses Wissens. Aus einzelnen vorliegenden, zu generierenden und zusammenzufügenden Informationsbausteinen wird so ein Wissensgebäude erstellt. Fehler bei diesem Denken und Handeln sind „Mängel oder Misserfolge bei den Beurteilungs- und Schlussfolgerungsprozessen [...], die bei der Auswahl eines Ziels oder bei der Spezifikation der Mittel, um dieses Ziel zu erreichen, eine Rolle spielen, unabhängig davon, ob die von diesem Entscheidungsprogramm geleiteten Handlungen planmäßig ablaufen“ [REASON 1992 S. 9]. Sie stellen eine Gefahr für eine erfolgreiche Problemlösung dar. Werden Fehler nicht erkannt, können sich schwerwiegende Folgen ergeben, wie ein Produktversagen und die Gefährdung von Mensch und Umwelt. Fehler können in Form von Fehldeuten, Fehlschließen, Fehlplanen und Fehlentscheiden auftreten. Kognitive Ursachen lassen sich beim Menschen für die Ent-

stehung von Fehlern finden. Verhaltensweisen, die das Handeln auf Basis einer Mustererkennung zu optimieren versuchen, riskieren darüber hinaus zusätzlich die Entstehung von Fehlern durch eine eingeschränkte Informationsaufnahme und -verarbeitung. Motivationale Ursachen und Emotionen sind mit den kognitiven Ursachen eng verknüpft und können fehlerfördernde Verhaltensweisen verstärken.

Zur erfolgreichen Problemlösung existieren Vorgehensmodelle und Methoden, die einen Weg aufzeigen oder Handlungsanweisungen zur Verfügung stellen, um ein Ziel zu erreichen. Dennoch kann es auch und gerade bei der Anwendung von methodischer Unterstützung zu Fehlern im Denken und Handeln kommen. Denn häufig zeigt sich, dass Entwicklern erforderliches Know-how zur erfolgreichen Anwendung dieser Hilfsmittel fehlt. Damit ergibt sich für den Anwender bei der Problemlösung ein zusätzliches Problem des richtigen Einsatzes methodischer Unterstützung. Viele Methoden und Vorgehensmodelle besitzen kritische Stellen. An diesen Stellen haben Anwender häufig Schwierigkeiten, hier ergibt sich ein hohes Risikopotenzial für Fehler. Zur Fehlervermeidung bei einem Einsatz sollten methodische Hilfsmittel ein Minimum an kritischen Stellen aufweisen. Ein falscher Methodeneinsatz etwa, der nicht zur Lösung eines Problems führt, kann beim Anwender eine allgemeine Frustration bezüglich der grundsätzlichen Verwendung von Methoden zur Folge haben. Mitunter sind kritische Stellen nicht zu vermeiden, weil die Unterstützung in vielen ähnlichen aber nicht gleichartigen Situationen möglich sein soll und daher eine entsprechend abstrahierte Beschreibung notwendig ist. In diesem Fall ist in der Beschreibung von Methoden auf dieses Risikopotenzial einzugehen. Zusätzlich können reflektive und frühzeitig bewertende Methodenelemente helfen bei einem Methodeneinsatz Fehler zu vermeiden, beziehungsweise ohne relevante Verzögerung zu erkennen. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde das Vorgehen der Lösung technischer Probleme über eine analoge Übertragung biologischer Phänomene oder deren wirkender Effekte hinsichtlich Effektivität und Effizienz optimiert.

Für eine Lösungssuche für technische Probleme bietet die Natur ein großes Potenzial. Dieses Vorgehen einer Angewandten Bionik kommt trotz methodischer Unterstützung bei Entwicklern nur selten zum Einsatz. Hierfür lassen sich vor allem zwei Gründe verantwortlich machen. Zum einen ist die methodische Unterstützung eben nicht ausreichend entwickelt, um den Anwender ganzheitlich zu unterstützen, zum anderen ergibt sich dadurch die Gefahr, zusätzliche Fehler bei der Problemlösung durch das methodische Vorgehen selbst zu generieren.

Für eine technische Problemlösung optimiert stellt das Bionische Vorgehensmodell nach Gramann eine allgemeine Vorgehensweise dar und unterstützt darüber hinaus die Suche nach Phänomenen in der Natur durch eine Assoziationsliste. Dennoch beinhaltet es wenige kritische Stellen, die ein Scheitern einer Anwendung möglich machen und zu Fehlern führen können. So findet der Anwender zwar biologische Phänomene, die abstrakte und schnelle Analyse und Auswahl geeigneter Systeme gestaltet sich meist nicht unproblematisch.

Dazu kommen Schwierigkeiten bei der Informationssuche und -verarbeitung. Aufgrund dieser bei einem Einsatz häufig auftretenden Probleme bei der Anwendung dieses methodischen Vorgehens wurde die Methode der Charakterisierenden Beschreibung entwickelt. Diese dient zur Unterstützung der abstrakten Analyse durch Nutzung vorhandener Information und ermöglicht dabei durch die Verwendung von Parametern, Objekten und Eigenschaften die Übersetzung der biologisch codierten Information in die technische Sprache und umgekehrt. Weiterhin wird die frühzeitige Analyse und Auswahl relevanter biologischer Phänomene durch den Abgleich mit der spezifizierten technischen Suchfunktion unterstützt. Ansätze zum weiteren Vorgehen werden durch das Ableiten von Differenzierungsmerkmalen erkannt. Ist die Erstellung relevanter Parameter, Objekte und Eigenschaften für die spezifische Problemstellung nicht möglich, weil etwa spontan keine biologischen Phänomene gefunden werden, so kann eine zielgerichtete Suche durch die Liste biologisch-technisch relevanter Parameter und Eigenschaften durchgeführt werden. Durch die Charakterisierende Beschreibung werden kritische Stellen des bisherigen Vorgehens aufgelöst und analysierend-reflektive Elemente integriert. Der Erfolg dieses methodischen Hilfsmittels konnte in zwei Fallbeispielen nachgewiesen werden. Bei der Anwendung erkannte, unvermeidbare kritische Stellen dieser Methode wurden diskutiert und bewusst genannt, um zusätzliche Fehler bei der Anwendung durch unerfahrene Entwickler zu vermeiden beziehungsweise zu verringern.

Durch diese Dissertation konnte allgemein ein Baustein zur erfolgreichen Generierung, Vermittlung und fehlervermeidenden Anwendung von methodischen Hilfsmitteln generiert und vorgestellt werden. Im Speziellen war es darüber hinaus möglich, das Vorgehen der Angewandten Bionik zur Lösung technischer Probleme in Produktentwicklungsprozessen durch die Übertragung biologischer Phänomene und ihrer Effekte entscheidend zu optimieren und die Anwendbarkeit in der Praxis deutlich zu verbessern. Dies stellt nicht zuletzt seinerseits einen wesentlichen Beitrag zur fehlervermeidenden Produktentwicklung und damit zur Erstellung innovativer und erfolgreicher Produkte dar.

## 6.2 Ausblick

Der Faktor Mensch ist maßgeblich für die erfolgreiche Lösung bestehender Probleme durch methodische Hilfsmittel. Fehler im Denken und Handeln der Menschen als ein zentrales Element dieses Faktors sind bei der Verwendung von Methoden und Vorgehensweisen regelmäßig zu beobachten und gegenständlich in mangelbehafteten Produkten zu finden. Diese Arbeit widmet sich dieser Thematik und zeigt dabei ein Potenzial für die Generierung erfolgreich anwendbarer Methoden auf. Die Optimierung der Angewandten Bionik als Methode zur Lösungssuche bestätigt die Wichtigkeit der Betrachtung menschlichen Denkens und Verhaltens bei der Forschung im Bereich der Entwicklungsmethodik. Die Zusammenarbeit mit Kogniti-

onspsychologen leistet hierbei einen wertvollen Beitrag, schlussendlich aber auch für Unternehmen bei der Entwicklung erfolgreicher, meist innovativer Produkte. Die gemeinsame interdisziplinäre Forschung ist deshalb weiterhin und durchaus stärker zu fördern als bisher.

Gerade in der Ausbildung von Ingenieuren wäre die Vermittlung von psychologischen Grundlagen des menschlichen Denkens und Handelns sowie ihren kognitiven und motivationalen Faktoren vorteilhaft. Das Wissen und das Bewusstsein über menschlich begründete Verhaltensweisen, Fähigkeiten aber auch Mängel führt letztlich zu höher qualifizierten Ingenieuren.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Thema Fehler vor allem bei der Methodenanwendung in frühen Phasen der Entwicklung beleuchtet. Hier ließen sich zahlreiche vorhandene Methoden und Vorgehensmodelle unter diesem Gesichtspunkt prüfen und optimieren. Fehler passieren bei der Produktentwicklung nicht nur bis zur Entwicklung von Konzepten. Vielmehr sind auch nachfolgende Prozesse, beispielsweise die Detaillierung in CAD, Produktions- und Qualitätssicherungsabläufe, von dem Faktor Mensch beeinflusst, fehlerbehaftet und häufig noch zu wenig unterstützt. Die Vermeidung von Fehlern durch Wissensmangel aufgrund fehlender, falscher oder überflüssiger Information in diesen Prozessen würde zur Umsetzung besserer Produkte beitragen und die magischen Faktoren Qualität, Kosten und Zeit durchaus positiv beeinflussen.

Mit dem methodischen Hilfsmittel der Charakterisierenden Beschreibung ist ein weiterer kleiner Schritt zur Anwendung eines bionischen Vorgehens im industriellen Umfeld gemacht worden. Über die durchgeführten Fallbeispiele zur Validierung hinaus ist die Erprobung dieser Angewandten Bionik und ihrer Hilfsmittel durch Entwickler aus der Industrie sowie eine anschließende kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen anzustreben.

In dieser Arbeit wird häufig von Schwierigkeiten und Problemen geschrieben. Schließlich ist es aber die Freude über die Generierung erfolgreicher Lösungen, die einem Entwickler eine Bestätigung für sein Handeln gibt.

## 7 Literatur

ALTSCHULLER, G. S. [1986]

Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme. Berlin: Verlag Technik 1986

ASIMOV, M. [1962]

Introduction to Design. Englewood Cliffs, NY: Prentice-Hall 1962

BADKE-SCHAUB, P. [2005]

Design Performance: How can we meet human limitations with human resources. 15<sup>th</sup>. International Conference on Engineering Design. ICED 2005, Melbourne (Australia), 15.-18.8.2005

BADKE-SCHAUB, P.; DÖRNER, D. [2002]

Am Anfang war das Wort – oder doch das Bild – oder doch das Wort.... In W. Hacker (Hrsg.), Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung der frühen Phasen. S.27-52. Zürich: Rainer Hampp Verlag 2002

BADKE-SCHAUB, P.; FRANKENBERGER, E. [2003]

Design Representation in Critical Situations of Product Development. In: Goldschmidt, G. & Porter, W. (Eds.): Design Representation. London: Springer 2003 (pp. 105-126)

BADKE-SCHAUB, P.; FRANKENBERGER, E. [2004]

Management Kritischer Situationen. Berlin: Springer 2004

BAUCH, C. [2004]

Lean Product Development - Making Waste transparent. München: TU Diplomarbeit 2004

BENNET-CLARK, H. C.; LUCEY, E. C. A. [1967]

The jump of the flea: A study of the energetics and a model of the mechanism. Journal of Experimental Biology (1967) 47, S. 59-76. 1967

BIRKHOFFER, H. [2004]

There is nothing as practical as a good Theory – An Attempt to deal with the Gap between Design Research and Design Practice. In Marjanovic, D. (Ed.): International Design Conference Design 200, Dubrovnik (Kroatien), 18.-21.05.2004. Zagreb: Sveucilisna tiskara 2004, S. 7-14.

BIRKHOFER, H.; SCHMIDT, J.C. [2004]

Potenziale und Probleme interdisziplinärer Forschung. Thema Forschung 2/2004, S. 62-71

BLÜCHEL, K.G. (HRSG) [2004A]

Evolution II (2004) 0-Nummer

BLÜCHEL, K.G. [2004B]

Die Schatztruhe der Schöpfung. Raum & Zeit 23 (2004) 130, S. 5-10.

BOURNE, L. E.; EKSTRAND, B. R.; DOMINOWSKY, R. L. [1971]

The Psychology of Thinking. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1971

BUBB, H. [1992]

Menschliche Zuverlässigkeit. Landsberg: ecomed - Fachverlag 1992

CAMP, R. [1994]

Brainstorming. München: Hanser 1994

DAENZER, W.F.; BÜCHEL, A. [2002]

Systems Engineering. Zürich: Verlag für industrielle Organisation 2002

DAVEY, G.; CULLEN, CH. [1988]

Human Operant Conditioning and Behavior Modification. New York: John Wiley & Sons Inc. 1988

DE BEAUNE, S.A. [2004]

The Invention of Technology - Prehistory and Cognition. In: Current Anthropology Vol. 45, 2, April 2004.

DETJE, F. [1996]

Sprichwörter und Handeln. Eine psychologische Untersuchung. Sprichwörterforschung Bd. 18. Bern: Peter Lang 1996

DETTNER, K. PETERS, W. (HRSG.) [2003]

Lehrbuch der Entomologie. Heidelberg: Spektrum 2003

DIN EN NORM 60312 [2001]

Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften von Staub- und Wassersaugern für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke. 2001

DÖRNER, D. [1987]

Problemlösen als Informationsverarbeitung. Stuttgart: Kohlhammer 3. Auflage 1987

DÖRNER, D. [1994]

Gedächtnis und Konstruieren In: Pahl, G. (Hrsg.): Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ergebnisse des Ladenburger Diskurses von Mai 1992 bis Oktober 1993. Köln: TÜV Rheinland 1994

DÖRNER, D. [1998]

Das Denken beim Konstruieren. In Pahl, G. (Hrsg): Wolfgang Beitz Gedenkband. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1998

DÖRNER, D. [2001]

Bauplan für eine Seele. Reinbeck bei Hamburg: Rowolth Taschenbuch Verlag 2001

DÖRNER, D. [2004]

Die Logik des Misslingens. Reinbeck bei Hamburg: Rowolth Taschenbuch Verlag 3. Auflage 2004

DÖRNER, D.; KREUZIG, H. W.; REITHER F.; STÄUDEL, TH. [1994]

Lohhausen - Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität. Bern: Verlag Hans Huber unveränderter Nachdruck der 1. Auflage 1994

DUDENREDAKTION (HRSG.) [2005]

Duden, das Fremdwörterbuch. Mannheim: Bibliographisches Institut 8. Auflage 2005

DUNKER, K. [1963]

Zur Psychologie des produktiven Handelns. Berlin: Springer 1963

EHRENSPIEL, K. [2003]

Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser 2. Auflage 2003

EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U. [1998]

Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2. Auflage 1998

ERNZER, M.; OBERENDER, C.; BIRKHOFFER, H. [2002]

Methods to Support EcoDesign in the Product Development Process In: Going Green - Care Innovation 2002. Nov 25-28 Paper number: 04.04. Vienna, Austria: CD-Rom 2002

FRANKENBERGER [1997]

Arbeitsteilige Produktentwicklung - Empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion. VDI-Forschungs-berichte, Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente.. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997

FRICKE, G. [1993]

Konstruieren als flexibler Problemlöseprozess. Düsseldorf: VDI 1993

Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1 Nr.227

FUNKE, J. [2003]

Problemlösendes Denken. Stuttgart: Kohlhammer 2003

GADENNE, V.; OSWALD, M. [1986]

Entstehung und Veränderung von Bestätigungstendenzen beim Testen von Hypothesen. Mannheim: Fakultät für Sozialwissenschaften 1986

GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; SCHUH, G. [2004]

Planung der Produkte und Fertigungssysteme für die Märkte von morgen. Frankfurt: VDMA Verlag 2004

Abschlussbericht BMBF

GERO, J. [1998]

Towards a Model of Designing Which Includes its Situatedness. In H. Grabowski, S. Rude & G. Grein (eds.), Proceedings of the Workshop Universal Design Theory. Karlsruhe, Germany, pp.47-55. 1998

GIBBS-SMITH, C. H.; REES, G. [1978]

The Inventions of Leonardo da Vinci. Oxford: Phaidon, U.K. 1978

GRAEBSCH, M. [2005]

Information and Communication in Lean Product Development. München: TU Diplomarbeit 2005

GRAMANN, J. [2004]

Problemmodelle und Bionik als Methode. München: Dr. Hut 2004

(Zugl.: München: TU, Diss. 2004)

GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J. [2004]

Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 19 Auflage 2004

HACKER, W. [1998]

Allgemeine Arbeitspsychologie. Bern: Hans Huber 1998

HACKER, W. (HRSG.) [2002]

Denken in der Produktentwicklung. Zürich: Rainer Hampp Verlag 2002

HERBIG, B. [2001]

Vergleichende Untersuchung von Struktur und Inhalt expliziten und impliziten Wissens im Arbeitskontext. Aachen: Shaker 2001

(Zugl.: München: TU, Diss. 2000)

HILL, B. [1997]

Innovationsquelle Natur. Aachen: Shaker 1997

HILL, B. [2005]

Naturorientierte Innovationsstrategie - Entwickeln und Konstruieren nach biologischen Vorbildern. In Rossmann, T.; Tropea, C (eds.), Bionik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2005

HUTTERER, P. [2005]

Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung. München: Dr. Hut 2005

(Zugl.: München: TU, Diss. 2005)

KIENECKER, S. [1999]

Retten Sie Ihr Wissenskapital. Versicherungswirtschaft 9. 1999

KOLLER, R. [1985]

Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer 1985

LINDE, H.; HILL, B. [1993]

Erfolgreich erfinden. Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie für Entwickler und Konstrukteure. Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag 1993

LINDEMANN, U.; DEMERS, M.; GERST, M.; WULF, J. [2001]

Lösungssuche mit Hilfe von Zielformulierungen. Konstruktion 53 (2001) 4, S. 92-97

LUGER, G.F. [2002]

Künstliche Intelligenz. München: Pearson Studium 2002

MAK, T., SHU, L. [2002]

Use of Biological Phenomena in Design by Analogy, Proceedings of 2004 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Salt Lake City, Utah, September 28-October 2, 2002, DETC2002/DTM-57303. 2002

MAK, T.W., SHU, L.H. [2004]

Abstraction of Biological Analogies for Design In: CIRP Annals, Vol. 53/1 (2004):117-120. 2004

MÉRÖ, LÁSZLÓ [2000]

Die Logik der Unvernunft. Hamburg: Rowolth Taschenbuch Verlag 2000

LINDEMANN, U. [2005]

Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2005

MILLARD, R.L. [2001]

Value Stream Analysis and Mapping for Product Development. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, master thesis 2001

MILLER G.A.; GALANTER, E.; PRIBRAM, K.H. [1960]

Plans and the structure of behaviour. New York: Holt 1960

NACHTIGALL, W. [1997]

Vorbild Natur. Berlin: Springer 1997

NACHTIGALL, W. [1998]

Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin: Springer 1998

NEUMANN, P. [1993]

Technologieanalyse Bionik. Düsseldorf: VDI 1993

NEWELL, A.; SIMON, H.A. [1972]

Human Problem Solving. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1972

OSBORN, A.F. [1957]

Applied Imagination. Principles and procedures of creative problemsolving. New York: Scribner 1957

PACHE, M. [2005]

Scetching for Conceptual Design. TU-Diss: 2005

(Zugl.: München: TU, Diss. 2005)

PAHL, G. [1999]

Denk- und Handlungsweisen beim Konstruieren. Konstruktion, 6, 11-17. 1999

PAHL, G.; BEITZ, W. [2004]

Konstruktionslehre. Berlin: Springer 5. Auflage 2004

POPPER, K. R. [2002]

Alles Leben ist Problemlösen. München: Piper Verlag GmbH 7 Auflage 2002

RASMUSSEN, J. [1986]

Information processing and human-machine interaction. New York: North-Holland 1986

RASMUSSEN, J.; JENSEN, A. [1974]

Mental procedures in real life tasks: A case study of electronic troubleshooting. Ergonomics, 17, 293-307. 1974

REASON, J. T. [1992]

Human Error. Cambridge: Cambridge Univ. Press 2nd Repr Auflage 1992

RECHENBERG, I. [1994]

Evolutionsstrategie '94. Stuttgart: Frommann-Holzboog 1994

REINHART, G.; LINDEMANN, U.; HEINZL, J. [1996]

Qualitätsmanagement. Berlin: Springer 1996

RIOPELLE, A.J. [1967]

Animal Problem Solving. Middlesex: Penguin Books 1967

ROSEMANN, B.; MEERKAMM, H. [2002]

Der sanfte Sauger mit IPPsilon-Faktor. In: Müllmagazin Ausgabe 2/2002. Rhombos-Verlag 2002

ROTH, K. [1994]

Konstruieren mit Konstruktionskatalog. Band 2: Konstruktionskataloge. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1994

ROTH, K. [1996]

Konstruieren mit Konstruktionskatalog. Band 3: Verbindungen und Verschlüsse. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1996

ROTH, K. [2000]

Konstruieren mit Konstruktionskatalog. Band 1: Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2000

ROTHSCHILD, M.; HOPKINS, G. H. E.; MARDON, D. K.; SMIT, F. [1953-1971]

An illustrated catalogue of the Rothschild Collection of Fleas (Siphonaptera) in the British Museum (Natural History). Band 1 bis 5. Oxford: Oxford University Press 1953-1971

RUTZ, A. [1985]

Konstruktion als gedanklicher Prozess. München: TU Diss 1985

RYLE, G. [1949]

The Concept of Mind. London: Hutchinson 1949

SCHAUB, H. [1996]

Exception error: Über Fehler und deren Ursachen beim Handeln in Unbestimmtheit und Komplexität. In gdi impuls (1996) 4. 1996

SCHMIDT, N. [2005]

Optimierung technischer Systeme durch biologische Phänomene. Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2246. Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München 2005

SCHUSTER, I. [2006]

Methoden in der Produktentwicklung: Der Einfluss von Methodeneinsatz auf den Problemlöseprozess und die Problemlösequalität, unveröffentlichte Diplomarbeit. Bamberg: Institut für theoretische Psychologie, Otto-Friedrich-Universität Bamberg 2006

SCHWANKL, L. [2002]

Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung. München: Dr. Hut 2002

(Zugl.: München: TU, Diss. 2002)

SCHWEFEL, H.-P. [1995]

Evolution and Optimum Seeking. New York: Wiley & Sons 1995

SEMMER, N.; REGENASS, A. [1996]

Mechanismen, Verhütung und Korrektur von menschlichen Fehlhandlungen. Erschienen in G.Grote & S.Künzler (Hrsg.): Theorie und Praxis der Sicherheitskultur. Zürich: Verlag der Fachvereine 1996

SHU, L. H. [2004]

Generalizing the Biomimetic Design Process, Canadian Design Engineering Network Design Conference, Montreal, Quebec, July 29-30, 2004. (Invited opening paper). Montreal, Canada: 2004

STRÄTER, O.; PREISCHL, W.; BERNING, A. [1996]

Vergleichende Auswertung probabilistischer Sicherheitsanalysen im Bereich Personalhandlungen. Dossenheim: grm 1996

STROHSCHNEIDER, ST. (HRSG.) [2003]

Entscheiden in kritischen Situationen. Frankfurt: Verlag für Polizeiwissenschaft 2003

STROHSCHNEIDER, ST.; TISDALE, T. [1987]

Handlungspsychologie. Kurseinheit 3. Handlungsregulation in Unbestimmtheit und Komplexität. Hagen: Fernuniversität Hagen 1987

THORNDYKE, E.L.; GATES, A. I. [1930]

Elementary Principals of Education. New York: MacMillan 1930

ULLMAN, D. [1997]

The mechanical Design Process - 2. Auflage. Singapur: Mc Graw-Hill 2. Auflage 1997

VDI-RICHTLINIE 2221 [1997]

Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997

VESTER, F. [2000]

Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. Stuttgart: DVA 3. Auflage 2000

VON DER WETH, R. [1998]

Having a Nose for Good Solutions – The Development of Individual Strategies for the Design Process. In: Frankenberger, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H. (Eds.): Designers – The Key to Successful Product Development. Berlin: Springer 1998. S. 98-108.

WAHRIG, G.; WAHRIG-BURFEIND, R [2002]

Wahrig - Deutsches Wörterbuch. Wissen Media Verlag 2002

WALLACE, K. [1991]

Some observations on design thinking. In N. Cross, K. Dorst & N. Roozenburg (eds.), Research in design thinking. Proceedings of a workshop meeting. Delft, NL, 29.-31.05.1991. S.75-86. 1991

WIGGLESWORTH, V.B. [1955]

Physiologie der Insekten. Basel, Stuttgart: Birkhäuser 1955

WIKIPEDIA [2005A]

Schach. [Entnommen am 12.6.2005, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schach>]

WIKIPEDIA [2005B]

ICE-Unfall Eschede. [Entnommen am 16.3.2005, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/ICE-Unfall%20Eschede>]

WIKIPEDIA [2005C]

Systematik (Biologie). [Entnommen am 17.5.2005, URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Systematik\\_%28Biologie%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Systematik_%28Biologie%29)]

WULF, J. [2002]

Elementarmethoden zur Lösungssuche. München: Dr. Hut 2002

(Zugl.: München: TU, Diss. 2002)

ZANKER, W. [1999]

Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden. Aachen: Shaker 1999

(Zugl.: München: TU, Diss. 1999)

ZERBST, E. [1987]

Bionik: Biologische Funktionsprinzipien und ihre Anwendung. Stuttgart: Teubner 1987



## **8 Anhang**

Liste biologisch-technisch relevanter Parameter und Ausprägungen



Bereiche	Parameter	Ausprägung
<b>Zeit</b>	Dauer	kurz lang (Sekunden)
	Frequenz	hoch niedrig (Hertz)
	Geschwindigkeit	schnell langsam (cm/s)
	Reaktionszeit	schnell langsam (Sekunden)
	Verlauf	progressiv degressiv linear impulsartig kontinuierlich wellenförmig
<b>Kraft</b>	Angriff	zentral verteilt
	Beschleunigung	schwach stark
	Bewegung - Transport (Kontraktion, Entspannung, Vermischung)	statisch dynamisch isokenisch lokal synchronisiert
	Druck	niedrig hoch (Pascal)
	Gewicht	niedrig hoch (Gramm)
	Größe	schwach stark (Newton)
	Orientierung	
	Reibung	niedrig hoch
	Temperatur	niedrig hoch
	Verformung	schwach stark elastisch plastisch
	Verteilung	
	Weiterleitung	

Bereiche	Parameter	Ausprägung
<b>Energie</b>	Mechanische Energie Kinetische Energie Potentielle Energie Schwingungsenergie Schallenergie Wellenenergie Elastische Energie (Deformationsenergie)	niedrig hoch (Newtonmeter)
	Thermische Energie	
	Elektrische Energie	
	Magnetische Energie	
	<b>Bindungsenergie</b> Chemische Energie Kernenergie (Innere Energie)	
<b>Information</b>	Ausprägung	niedrig hoch teilweise vollständig
	Bauplan	
	Form	strömungsgünstig angriffsfläche widerstandsmindernd ans Medium angepasst
	Kodierung	keine einfach komplex nicht erkennbar veränderbar
	Muster - Tarnung	
	Parameteranzahl	fest variabel niedrig hoch
	Schema	
	Übermittlung	optisch akustisch elektrisch elektrochemisch vibration
<b>Durchführung / Umsetzung</b>	Aggregatzustandsänderung	
	Funktionsweise	einfach komplex
	Nachahmung	teilweise vollständig
	(Re-)Organisation	geordnet (erkennen, verarbeiten, reaktion) chaotisch

Bereiche	Parameter	Ausprägung
	Replikation - Reduplikation	nein unvollständig zweckerfüllend vollständig
	Schutzfunktion	Ausgleich Minderung
	Stabilisation	langsam schnell teilweise
	Umkehrbarkeit	nein teilweise begrenzte Anzahl vollständig
	Umsatz / Durchsatz	wenig/niedrig viel/hoch steuerbar
	Variabilität	
	Wiederholbarkeit	nein teilweise begrenzte Anzahl unendlich
	Wirkungsgrad (Verlust)	niedrig hoch
<b>Sensorik</b>	Auflösung	niedrig hoch
	Genauigkeit	niedrig hoch
	Messbereich - Belastbarkeit	klein groß
	Signalstärke (Potentialunterschied)	klein groß
<b>Material- eigenschaften</b>	Absorption(sgrad) (Halbwertsschicht, Halbwertsdicke)	niedrig hoch
	Adhäsion - Haftung	niedrig hoch
	Beschichtung	antihaftend gut haftend wasserunlöslich wasserabweisend 'undurchdringlich' reibungsmindernd strömungsverbessernd lichtabsorbierend
	Bruchfestigkeit (Zug-, Druck-, Biege-, Schubfestigkeit)	niedrig hoch
	Dehngrenze	
	Dichte	

Bereiche	Parameter	Ausprägung
	<b>Elastizität</b> - plastische Dehnbarkeit (Bruchdehnung, Sprödigkeit, Plastizität, Hochtemperaturplastizität, Steifigkeit, Kriechverformung, Superplastizität, Umformbarkeit, Zähigkeit)	gering hoch
	elektrische Leitfähigkeit	Leiter Halbleiter Isolator
	Farbe	
	Fasersättigungsbereich	niedrig hoch
	Festigkeit	niedrig hoch
	Gefrierpunkt Taupunkt Schmelzpunkt Siedepunkt	
	Härte	weich hart
	Katalysator	
	Kriechen (Retardation)	nicht vorhanden Kompensation langsam
	Lastwechsel (Kurzzeitfestigkeit)	kaum häufig
	Lichtecktheit	gering gut
	Oberflächenstruktur	antihaftend gut haftend wasserabweisend reibungsmindernd strömungsverbessernd lichtabsorbierend
	Porösität - Durchlässigkeit Dichtigkeit	kaum semipermeabel hoch in Zshg. mit Filter, Plastizität
	Reissfestigkeit (Reißlänge)	niedrig hoch
	Schwindenmaß (Quellmaß)	nicht vorhanden kaum hoch
	Temperaturresistenz	niedrig hoch (extrem)
	Wärmeleitfähigkeit	schlecht gut
	Struktur - Textur (Kristallographie)	Filtereigenschaft

## 9 Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching  
Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:  
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode. München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:  
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.  
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:  
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.  
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:  
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.  
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:  
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.  
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:  
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.  
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:  
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.  
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:  
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.  
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:  
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.  
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:  
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.  
München: TU, Diss. 1978.
- D11 HEISIG, R.:  
Längencodierer mit Hilfsbewegung.  
München: TU, Diss. 1979.

- D12 KIEWERT, A.:  
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.  
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:  
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60).  
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:  
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.  
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:  
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.  
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:  
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.  
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:  
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.  
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:  
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.  
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:  
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.  
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:  
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.  
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985. Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:  
Konstruieren als gedanklicher Prozess.  
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMAN, H. J.:  
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.  
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:  
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gussgehäusen.  
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:  
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.  
München: TU, Diss. 1987.
- D25 FIGEL, K.:  
Optimieren beim Konstruieren.  
München: Hanser 1988. Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.

## Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:  
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.  
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1). Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:  
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.  
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2). Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSTEINER, H.-J.:  
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.  
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3). Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:  
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluss an ein CAD-System.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:  
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.:  
Datenbankgestützte Teileverwaltung und Wiederholteilsuche.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D32 NEESE, J.:  
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.  
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:  
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.  
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:  
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.  
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:  
Systematischer Entwicklungsprozess am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:  
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:  
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D38 LENK, E.:  
Zur Problematik der technischen Bewertung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:  
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14). Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D40 SCHIEBELER, R.:  
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:  
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:  
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:  
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:  
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:  
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:  
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.  
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:  
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.  
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:  
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.  
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:  
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.  
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:  
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.  
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25). Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.:  
MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:  
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.  
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPPOULIS, A.:  
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D53 STEINMEIER, E.:  
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:  
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29). Zugl. München: TU, Diss. 1998.

- D55 GÜNTHER, J.:  
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIERSACK, H.:  
Methode für Kraftleinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.  
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:  
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.  
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:  
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖSSER, R.:  
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:  
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:  
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:  
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.  
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36). Zugl. München: TU, Diss. 1999.

### Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:  
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D64 ASSMANN, G.:  
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.  
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:  
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.  
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.  
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.  
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D67 STETTER, R.:  
Method Implementation in Integrated Product Development.  
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:  
Modell der Methoden- und Hilfsmittelführung im Bereich der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42). Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D69 COLLIN, H.:  
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:  
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:  
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:  
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:  
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.  
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:  
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.  
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:  
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:  
Elementarmethoden zur Lösungssuche.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:  
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:  
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:  
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.  
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:  
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.  
München: TU, Diss. 2003.
- D81 GRAMANN, J.:  
Problemmodelle und Bionik als Methode.  
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D82 PULM, U.:  
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D83 HUTTERER, P.:  
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:  
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 58). Zugl. München: TU, Diss. 2005.

- D85 PACHE, M.:  
Sketching for Conceptual Design.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:  
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.  
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:  
Anforderungskklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung, Band 61). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:  
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.  
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung, Band 62). Zugl. München: TU, Diss. 2006.