

Lehrstuhl für Produktentwicklung

Problemmodelle und Bionik als Methode

Jens Gramann

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. Klaus Bender
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Herbert Birkhofer,
Technische Universität Darmstadt

Die Dissertation wurde am 26.11.2003 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 19.02.2004 angenommen.

Natura nihil est callidius

Es gibt nichts erfinderischeres als die Natur / Marcus Tullius Cicero (106-43 v. Chr.), römischer Rhetoriker, Philosoph, Staatsmann.

Vorwort des Herausgebers

Problemstellung

Die Suche nach Lösungen für technische Problemstellungen ist in der industriellen Praxis ein Prozess, der ein hohes Maß an Kreativität erfordert, in der Regel aber auch unter einem enormen Zeit- und Kostendruck ablaufen muss. Seitens der Konstruktionsforschung werden daher vielfältige Methoden und Hilfsmittel angeboten, die den Entwickler in diesem Spannungsfeld unterstützen sollen. Bei der Umsetzung zeigen sich an einigen Stellen allerdings Widersprüche gegenüber Forschungsergebnissen der Psychologie und auch Erfahrungen aus der Praxis.

Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, Erkenntnisse der Kognitionspsychologie und Beobachtungen aus der praktischen Methodenanwendung in eine Diskussion der entsprechenden Methoden zu integrieren. Aus dieser Diskussion sollen forschungs- und anwendungsrelevante Empfehlungen abgeleitet werden, die in methodische Konzepte einfließen und den Entwickler zu mehr Kreativität bei gleichzeitig höherer Effizienz verhelfen sollen.

Ergebnisse

Es zeigen sich teilweise deutliche Abweichungen zwischen einigen klassischen Lehrmeinungen der Konstruktionswissenschaft einerseits und Erkenntnissen der Kognitionspsychologie andererseits. Beobachtungen der Methodenanwendung in der Praxis untermauern die Notwendigkeit einer anderen, erweiterten Sicht der Konstruktionsforschung. Abweichungen, die im Rahmen dieser Arbeit als besonders kritisch identifiziert wurden, sind die Unterbewertung der Rolle von Problemmodellen, sowie die verbesserungsfähige Integration von externem Wissen in den Entwicklungsprozess. Ansätze zur Verbesserung schlagen sich in dem methodischen Konzept physikalischer Problemmodelle nieder, die sich in Entwicklungsprojekten in Zusammenarbeit mit der Industrie besonders bewährt haben. Methodische Konzepte zur Verbesserung der Integration externen Wissens wurden im Rahmen einer Fallstudie entwickelt und validiert. Ergebnisse sind hier ein Vorgehensmodell und ein Hilfsmittel (Assoziationsliste) zur Suche und Übertragung von Analogien aus der Biologie für die Technik (Bionik). Die letztgenannten Ansätze beschränken sich dabei in ihrer prinzipiellen Gestaltung nicht zwangsläufig auf die Integration von Wissen aus der Biologie. Sie stellen vielmehr einfache aber wirkungsvolle Werkzeuge dar, die mit den im Bereich des Wissensmanagement etablierten konkurrieren können.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Die Integration kognitionspsychologischer Erkenntnisse zeigt „Erfolgsfaktoren“ für die Produktentwicklung auf, die in der Praxis vergleichsweise einfach umsetzbar sind. Dazu zählt vor allem der explizite Aufbau von Problemmodellen. Diese ermöglichen gerade in ihrer Ausprägung als physikalisches Problemmodell eine Identifikation des prinzipiellen Lösungsraums und eine frühe, qualifizierte Beurteilung von Lösungsansätzen. Dem Entwickler dergestalt den Blick zu schärfen, führt letztlich zu der als Ziel gesetzten Steigerung der Kreativität und Effizienz.

Die in dieser Arbeit beschriebene Fallstudie zeigte, dass Bionik – letztlich also der Blick über den Tellerrand – zu sehr starken Innovationen führen kann. Die in dieser Arbeit angebotenen Methoden und Hilfsmittel machen Bionik durch ihre einfache Gestaltung auch für rein technisch geschulte Anwender praktikabel. Betrachtet man die prinzipielle Gestaltung dieser Ansätze, präsentieren sie sich als sehr ökonomische Katalysatoren zur Integration von externem Wissen in die Produktentwicklung, die auch außerhalb der Bionik interessant sind.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

Die differenzierte Betrachtung des Standes der Forschung mittels Integration kognitionspsychologischer Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Anwendung von Methoden „in vivo“ stellt einen interessanten Ansatz für die Konstruktionsforschung dar. Dieses letztlich interdisziplinäre Vorgehen wirft Fragen auf, die teilweise selbst etablierte Methoden einer deutlichen, in Zusammenhang mit Erfahrungen aus der Praxis mit Sicherheit berechtigten Kritik unterziehen. Gleichwohl stellen die in dieser Arbeit identifizierten Schwachstellen einiger Methoden und ihrer Anwendung nur den Anfang eines für die Kognitionsforschung notwendigen Prozesses dar, der zur Entwicklung von Methoden führt, die im industriellen Alltag entgegen der heutigen Situation auch tatsächlich Relevanz gewinnen. Die vorliegende Arbeit unterstützt damit den in den letzten Jahren immer lauter werdenden Ruf nach einem Paradigmenwechsel in der Konstruktionsforschung.

Garching, Mai 2004

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

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München vom Mai 2000 bis zum Dezember 2003.

Meinem damaligen Chef, Prof. Lindemann danke ich für die Unterstützung meiner Tätigkeit am Lehrstuhl. Seine Offenheit für neue, oft auch unkonventionelle Sichtweisen, verbunden mit stets konstruktiver Kritik und dem Gewähren gestalterischer Freiheit hat sicherlich nicht unerheblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Prof. Birkhofer danke ich für die Mitberichterstattung und Prof. Bender für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die gute Zusammenarbeit in Projekten, Forschung und Lehre sowie für das unverkrampte und inspirierende Umfeld. Zu diesem Kreis zähle ich ebenfalls eine ganze Reihe von Studenten, deren Tätigkeiten sich auch in den Ergebnissen dieser Arbeit niederschlagen. Meine persönliche Erfahrung, dass der „Lehrende“ auch sehr viel vom „Lernenden“ lernen kann, unterstreicht für mich den Wert der Verknüpfung von Forschung und Lehre.

Dank gilt auch allen Projektpartnern in der Industrie. Das bei dieser Zusammenarbeit erlernte möchte ich nicht missen.

Abschließend gebührt meinem privaten Umfeld Dank für Rat und Tat, Ausgleich und Nachsicht.

München, Mai 2004

Jens Gramann

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN	5
2.1	FORSCHUNGSMETHODIK	5
2.2	BEGRIFFSWELT	8
3	DAS MENSCHLICHE GEDÄCHTNIS	11
3.1	GEDÄCHTNISMODELLE	11
3.2	KURZZEITGEDÄCHTNIS	13
3.2.1	<i>Ultra-Kurzzeitgedächtnis</i>	14
3.2.2	<i>Unmittelbares Gedächtnis</i>	14
3.2.3	<i>Arbeitsgedächtnis</i>	16
3.2.4	<i>Protokollgedächtnis</i>	21
3.3	LANGZEITGEDÄCHTNIS	22
3.3.1	<i>Semantisches Gedächtnis</i>	23
3.3.2	<i>Episodisches Gedächtnis</i>	28
3.3.3	<i>Priming</i>	29
3.3.4	<i>Exkurs in die Neurobiologie</i>	30
3.4	PROBLEMLÖSEN UND GEDÄCHTNIS	33
3.5	ÜBERBLICK UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	36
4	ARBEITSMETHODEN ZUR LÖSUNG TECHNISCHER PROBLEME	39
4.1	PROBLEMLÖSEN ALS DIALEKTISCHER PROZESS	39
4.2	METHODEN ZUR PROBLEMMODELLIERUNG	43
4.3	DIALEKTISCHE METHODEN	46
4.4	KREATIVITÄSTECHNIKEN	52
4.5	EXTERNE INFORMATION INTEGRIERENDE METHODEN	55
4.5.1	<i>Konstruktionskataloge</i>	56
4.5.2	<i>Prinzipien zum Lösen technischer Widersprüche</i>	63
4.5.3	<i>Bionik</i>	67
4.5.3.1	Methodische Ansätze für die Bionik	71
4.5.3.2	Fallstudien	75
4.6	ÜBERBLICK UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	79

5	PHYSIKALISCHE PROBLEMMODELLE	81
5.1	HYPOTHESEN	83
5.2	FALLBEISPIELE	84
5.2.1	<i>Konzept für eine Fahrzeugtür in Leichtbauweise</i>	84
5.2.2	<i>Konzept für ein Antriebssystem im Anlagenbau</i>	88
5.3	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	92
6	METHODISCHE ANSÄTZE FÜR DIE LÖSUNGSSUCHE MITTELS BIONIK	95
6.1	ERWEITERTES VORGEHENSMODELL FÜR DIE LÖSUNGSSUCHE MITTELS BIONIK	95
6.1.1	<i>Bionisches Vorgehensmodell</i>	97
6.1.2	<i>Fallbeispiel: Entwicklung einer Staubsaugerdüse</i>	104
6.2	HILFSMITTEL ZUR ASSOZIATIONSBILDUNG.	109
6.3	ZUSAMMENFASSUNG	111
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	115
7.1	ZUSAMMENFASSUNG	115
7.2	AUSBLICK	119
8	LITERATUR	121
9	ANHANG	131
10	DISSERTATIONSVERZEICHNIS DES LEHRSTUHL'S FÜR PRODUKTENTWICKLUNG	153

1 Einleitung

Vielleicht kommt Ihnen folgende Situation bekannt vor: Ihre Aufgabe ist es, Konzepte für eine technische Problemstellung zu erarbeiten. Sie haben es auch geschafft einige Lösungsalternativen zu entwickeln, die allem Anschein nach das Problem lösen und den Anforderungen genügen. Dennoch - wirklich zufrieden stellend sind diese Ansätze nicht. Möglicherweise geht Ihnen der Satz durch den Kopf „das muss doch auch irgendwie einfacher gehen...“. Schweren Herzens haben Sie sich schließlich damit abgefunden, dass die Lösungsalternativen, die Sie entwickelt haben zwar nicht besonders elegant sind, aber zumindest funktionieren. Einige Zeit später, möglicherweise am Wochenende, bei einer beliebigen Tätigkeit, die mit der Problemstellung die Sie bearbeiten nichts zu tun haben scheint, kommt Ihnen plötzlich wie aus dem Nichts der Einfall, wie Sie ihr Problem einfacher und eleganter lösen können....

Derartige Erfahrungen existieren meist in vielen Variationen. Allen gemein ist, dass man im Nachhinein den Verdacht nur schwer los wird, dass man gründlich „am Schlauch gestanden ist“. Es scheint unerklärlich, warum man den Einfall nicht schon längst hatte – alle nötige Information, sämtliches notwendige Wissen war bereits vorhanden. Man hatte die Lösung eigentlich schon „im Kopf“, man konnte sie lediglich nicht abrufen. Letztlich handelt es sich dabei um eine Eigenheit unseres Gedächtnisses. Sein größter Teil ist uns unbewusst. Wir schaffen es bestenfalls, winzige Fragmente dieses Wissens abzurufen, während der überwiegende Rest „im Dunkeln“ bleibt. Genau diese Eigenheit unseres Gedächtnisses dürfte dafür verantwortlich sein, dass „Erfinder“ oder andere kreative Personen von einem gewissen Nimbus umgeben sind, der sich auch in bildhaften Ausdrücken der Alltagssprache widerspiegelt: „Eine Eingebung haben“, „ein Licht aufgehen“, „eine Erleuchtung haben“, „von der Muse geküsst werden“ und viele andere mehr.

Die Konstruktionsforschung verfolgt die Intention, jedem Entwickler zu mehr Kreativität, zu besseren Ergebnissen, zu höherer Effizienz zu verhelfen. Stellt man sich - wie auch in dieser Arbeit - nun die Frage wie dies zu bewerkstelligen ist, wird man angesichts der oben dargelegten Beobachtungen nicht umhinkommen, sich mit „der Ursache allen Übels“, unserem Gedächtnis zu befassen. So beginnt diese Arbeit konsequenterweise nach einem allgemeinen Kapitel, in dem die Forschungsmethodik dargelegt wird und zentrale Begriffe definiert werden (Kapitel 2), mit einem Überblick über Gedächtnismodelle der kognitiven Psychologie, die zumindest eine vage Idee über die Funktionsweise unseres Gedächtnisses vermitteln soll (Kapitel 3). Was haben „vage Ideen“ in einer wissenschaftlichen Arbeit verloren? SAPOLSKY (2003) – ein Neurobiologe – zieht anlässlich der "Jahrestagung der Gesellschaft für Neurowissenschaften", auf der sich "28.000 Fachidioten" treffen, den re-

signierten Schluss: "Und über all dem schwebt die gemeinsame Erkenntnis, dass - obwohl Myriaden Hirnforscher sich abmühen - wir immer noch nicht den leisesten Schimmer haben, wie das Gehirn funktioniert.". Dennoch existiert eine Vielzahl von Erkenntnissen über Einzelaspekte unseres Gedächtnisses. Die Ergebnisse dieser Forschung sind hochinteressant für die Entwicklung von Methoden – erstaunlich ist, dass sie, obwohl in der kognitiven Psychologie teilweise schon „altbekannt“, sich kaum in der Literatur der Konstruktionsforschung niederschlagen.

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 dargestellten Gedächtnismodelle sollen in Kapitel 4 ausgesuchte Methoden der Lösungssuche kritisch hinterfragt werden. Auch die möglicherweise ungewöhnlich wirkende Auswahl der betrachteten Methoden orientiert sich letztlich an Ergebnissen der Kognitionspsychologie. Es sei an dieser Stelle vorweggenommen, dass die in der Konstruktionsforschung sehr starke Betonung der rein zur Synthese dienenden Methoden zur Förderung der Kreativität aus Sicht der Kognitionspsychologie, aber auch eigenen Beobachtungen folgend nicht haltbar ist. Die stellenweise sicherlich provozierende Betrachtung selbst etablierter Methoden wird eine „Übersichtskarte mit weißen Flecken“ über die Methodenlandschaft liefern. Diese soll bewusst zur Diskussion anregen (vgl. hierzu auch die Intentionen der Forschungsmethodik in Kapitel 2.1), aber vor allem als Grundlage für die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten methodischen Ansätze zur Unterstützung kreativer Prozesse dienen.

So beschäftigt sich Kapitel 5 mit der Erweiterung von Methoden zur Unterstützung des Aufbaus von Problemmodellen. Obgleich Problemmodelle eine - wie sich noch zeigen wird - enorm wichtige Grundlage für jeden technisch kreativen¹ Prozess sind, fristen sie in der Konstruktionsforschung fast seit ihrer Entstehung eher ein Schattendasein. Die dargestellten Ansätze resultieren letztlich aus einer Vielzahl praktischer Erfahrungen in Entwicklungsprojekten (siehe auch hierzu Kapitel 2.1).

In Kapitel 6 werden methodische Ansätze für die Synthese mittels Bionik vorgestellt. Diese letztlich sehr alte Methode zur Unterstützung der Lösungssuche kämpft trotz starker Präsenz in den Medien vergleichsweise erfolglos um ihre Renaissance (siehe hierzu auch Kapitel 4.5.3). Die vorgestellten Ansätze lassen sich in ihrer Struktur auch auf andere Bereiche übertragen. Dazu zählen die Formulierung von Zielen, Suchstrategien und ein Ansatz für einen alternativen „Aufbau“ von Wissensspeichern, die in ihrer Intention Konstruktionskatalogen ähneln.

Kapitel 7 schließlich soll die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammenfassen und auf ihrer Basis einen Ausblick auf denkbare weiterführende Forschungstätigkeiten liefern. Abbildung 1-1 bietet einen Überblick über den oben beschriebenen Aufbau der Arbeit.

¹ vgl. die Definition des Begriffs „technische Kreativität“ in Kapitel 2.

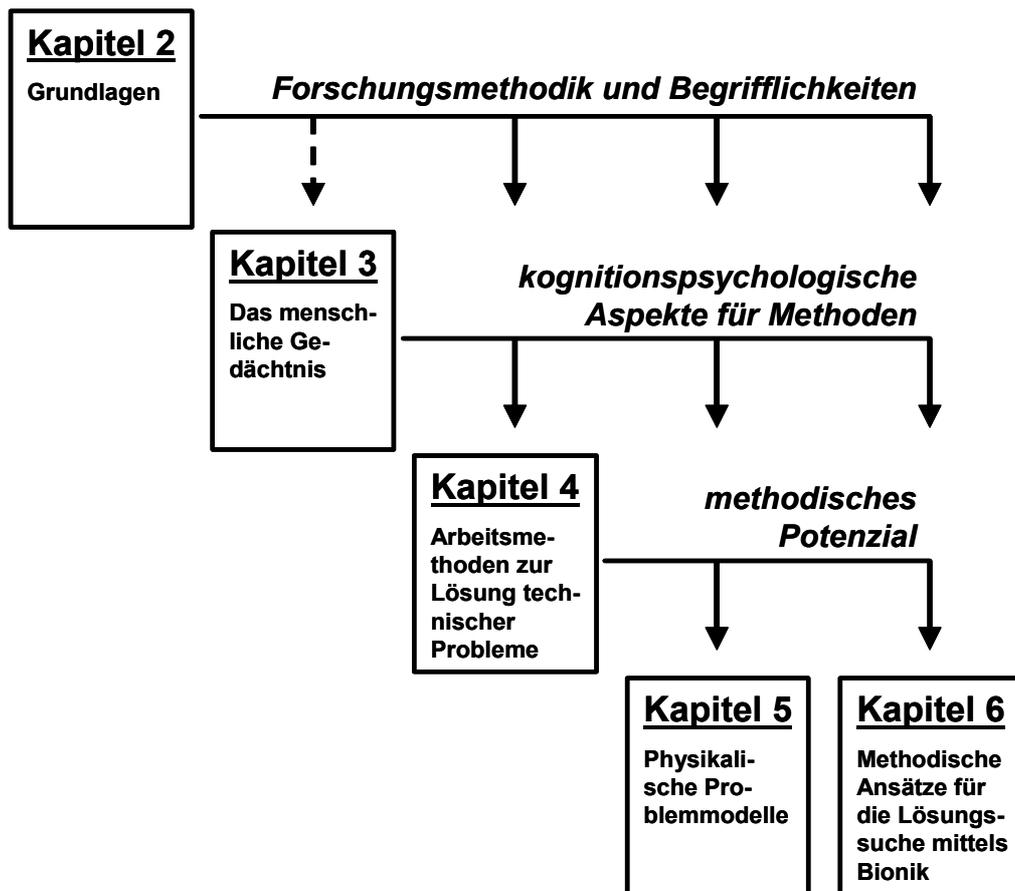


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit.

2 Grundlagen

In Kapitel 2 sollen die Grundlagen dieser Arbeit dargelegt werden. Dazu zählt die Forschungsmethodik, auf der die in dieser Arbeit dokumentierten Erkenntnisse und Überlegungen basieren. Das Kapitel schließt mit einer spezifischen Diskussion zentraler Begriffe in dieser Dissertation. Sowohl Forschungsmethodik als auch die Klärung wichtiger Begrifflichkeiten ist wichtig, um die Denkwelt, der diese Arbeit entstammt, zu betreten.

2.1 Forschungsmethodik

In dieser Arbeit beschriebene Erkenntnisse beruhen im Wesentlichen auf Beobachtungen in den Industrieprojekten, an denen ich in drei Jahren meiner Lehrstuhl­tätigkeit beteiligt war. In der Mehrheit dieser Projekte stand die Entwicklung technischer Konzepte im Vordergrund. In den übrigen Projekten galt es weniger technische als vielmehr organisatorische Probleme zu lösen. Abbildung 2-1 vermittelt einen Überblick über die oben angesprochenen Projekte. Weitere Quellen - vor allem für Fragestellungen bzgl. Bionik als Methode (siehe Kapitel 4.5.3 und 6) - waren von mir betreute Studienarbeiten, die bis auf drei Ausnahmen allesamt Entwicklungsaufgaben darstellten, die prototypisch umgesetzt wurden.

Erkenntnisse entstammen Reflexionen der oben angesprochenen Entwicklungsprozesse, die teilweise allein, teilweise in Diskussion mit beteiligten Kollegen und Studenten erfolgte. Sie dienten neben der Thesenbildung auch dem expliziten Testen methodischer Ansätze, stellen also auch den Versuch einer Validierung dar.

Es ist durchaus kritisch, mittels einer solchen Forschungsmethodik Aussagen zu gewinnen, die verallgemeinerbar sind (siehe hierzu auch WULF 2002, S. 34 ff). Reale Problemlösungsprozesse unterliegen einer unüberschaubaren Vielzahl von Faktoren. Deren Rolle und gegenseitige Beeinflussung ist immer noch aktueller Forschungsgegenstand der Psychologie. Meist stellt man sich bei der Reflexion eines Entwicklungsprozesses die Frage „was wäre gewesen wenn...“. Dies ist schlichtweg notwendig um Beobachtungen zu bewerten, ist aber leider auch sehr spekulativ. Immerhin können auf Basis solcher Gedankengänge Thesen gebildet werden.

Projektgegenstand	Beschreibung	Projektpartner
Herz-Lungen-Maschine (1)	Entwicklung eines Systems zur physiologischen Puls-erzeugung bei der extrakorporalen Zirkulation (Diplomarbeit)	Deutsches Herzzentrum München
Hochgeschwindigkeitsverzahnungsschleifmaschine	Entwicklung eines Maschinenkonzepts für eine Hochgeschwindigkeitsverzahnungsschleifmaschine (Forschungsprojekt der Bayerischen Forschungstiftung)	Werkzeugmaschinen-Hersteller
Herz-Lungen-Maschine (2)	Entwicklung einer automatisierten Regelung der Blutgaswerte bei der extrakorporalen Zirkulation	Deutsches Herzzentrum München
Türsysteme für Schienenfahrzeuge (1)	Wertanalyseprojekt mit technischen und organisatorischen Aspekten	Zulieferer für Hersteller von Schienenfahrzeugen
Türsysteme für Schienenfahrzeuge (2)	Entwicklung eines baukastenfähigen Konzepts für Türsysteme	Zulieferer für Hersteller von Schienenfahrzeugen
Antriebssystem	Entwicklung innovativer Konzepte für ein Antriebssystem im Anlagenbau (Forschungsprojekt der TUMtech)	Getriebehersteller
Bestückautomat	1) Erstellen einer Systematik für die Entwicklung und Verwaltung eines Baukastenprodukts. 2) Unterstützung bei der Einführung eines CAD/PDM-Systems.	Hersteller von Bestückautomaten für SMD-Technik
Tischlampe	Technische Umsetzung eines Designkonzepts (Forschungsprojekt der TUMtech)	Leuchtenhersteller
Lawinenairbag	Entwicklung eines Systems zur Fernauslösung von Lawinenairbags (Forschungsprojekt der TUMtech)	Hersteller von Lawinenairbags
Automobilinnenverkleidung	Integration von Konstruktionswissen in ein CAD-System	Automobilhersteller

Abbildung 2-1 Durchgeführte Projekte.

Die Validierung dieser Thesen allerdings ist in der Konstruktionsmethodik außerordentlich schwierig. Das Hauptproblem dabei ist, dass man für die Validierung unmöglich alle Randbedingungen einer zu beobachtenden Situation konstant halten kann. Wir können nicht einen Entwickler ein Konzept für ein und dasselbe Problem mit und ohne den Einsatz einer Methode generieren lassen. Dazu müsste man für das zweite Durchlaufen des Prozesses Gedächtnisinhalte der Versuchsperson auslöschen – ein utopischer Ansatz¹. Gangbar erschien in der Vergangenheit, statistische Versuche durchzuführen, bei denen mehrere Personen unabhängig voneinander das identische Problem bearbeiteten. Es zeigte sich allerdings, dass Einflussgrößen so vielfältig und voneinander abhängig sind, dass sich Beobachtungen in den Versuchen unmöglich einzelnen Faktoren zuordnen lassen (siehe GÜNTHER 1998). In der Pädagogik und der klinischen Psychologie werden sog. Multiple

¹ Immerhin gibt es „Anästhetika“, die dem Patienten zwar keinen Schmerz ersparen, aber die Erinnerung daran. Diese in der Medizin verwendeten Präparate („Nidazolan“ oder auch „Dormikum“, verwandt mit dem bekannteren Wirkstoff „Valium“) lösen auch eine retrograde Amnesie über ca. 15 Minuten aus, bieten also auf den ersten Blick zumindest prinzipiell die Möglichkeit für ein solches Versuchsdesign. Ob ein solches Vorgehen allerdings angemessen ist, ist äußerst fragwürdig.

Grundratenversuche durchgeführt (KERN 1997, S. 95 ff). Dazu müssten für die Konstruktionsforschung drei Versuchspersonen eine Reihe annähernd gleichwertiger technischer Problemstellungen bearbeiten. Reagiert die Versuchsperson in ihrem Problemlöseverhalten auf eine Intervention (z.B. Methodeneinsatz) durch die Veränderung eines beobachtbaren Parameters (Grundrate) in qualitativ gleicher Weise wie die beiden übrigen Versuchspersonen und ist die Reaktion unabhängig vom Zeitpunkt des Auftretens der Intervention innerhalb des Versuchs, hat man eine belastbare Aussage gewonnen (vgl. Abbildung 2-2). Bedauerlicherweise wurde die zumindest versuchsweise Übertragung dieser Forschungsmethode auf die empirische Konstruktionsforschung bislang noch nicht als förderungswürdig erachtet.

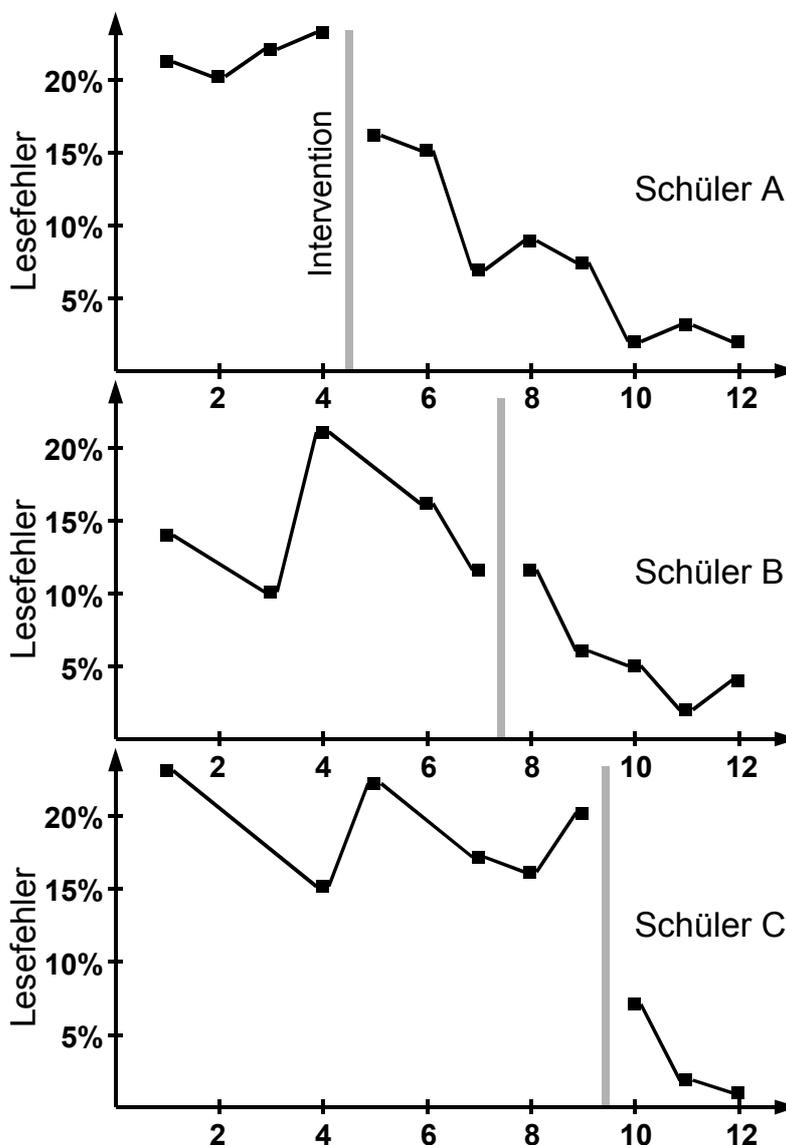


Abbildung 2-2: Grundratenverläufe der Lesefehlerhäufigkeit bei drei Schülern. Die Intervention ist eine Pädagogische Maßnahme (grauer Strich) [KERN 1997, S.123].

Inzwischen gelten die auch dieser Arbeit zugrunde liegenden Einzelfallstudien und Selbstbeobachtungen als anerkannte Methoden zur Validierung¹. Einzelfallstudien unterliegen wie oben erwähnt dem Problem, dass sich Randbedingungen nicht konstant halten lassen. Auch aus Selbstbeobachtungen abgeleitete Aussagen sind äußerst kritisch zu sehen: Habe ich nun keine Lösung für das Problem gefunden, weil die Methode Brainstorming schlecht ist, oder weil Freitagnachmittag ist und die Sonne scheint, oder weil ich mich gestern mit meiner Freundin gestritten habe, oder weil mein Hemdkragen kratzt? Gerade wenn man sich wie in dieser Arbeit die Frage stellt, wie man methodisch am besten zu guten Ideen kommt, hat man es mit großteils noch unerforschten Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen zu tun. Dennoch fand über die eingangs genannten Projekte hinweg ein gewisser Lernprozess bezüglich aus subjektiver Sicht effizienter Herangehensweisen statt, der zumindest als Indiz für die Richtigkeit einer These gelten kann. Es bleibt also dem Leser nicht erspart, Aussagen in dieser und auch anderen Arbeiten kritisch zu hinterfragen und mit eigenen Erfahrungen zu vergleichen.

2.2 Begriffswelt

Gerne verbinden wir mit dem Begriff Kreativität Geheimnisvolles, fast schon Mystisches. So wurde in der Antike der Kreativität gar ein göttliches Element zugewiesen: Schöpferische Leistungen in der Kunst beruhten im antiken Weltbild auf der Geneigtheit der Musen, Töchtern von Göttern. Dieser mythische Kontext erhielt sich bis heute in der Floskel „von der Muse geküsst“. Im Zeitalter technischer Errungenschaften und beginnender Industrialisierung schließlich wurde der Begriff Kreativität von den Künsten auf die Technik ausgeweitet. Ein Bild das in Zusammenhang mit der Kreativität als Klischee in sämtlichen Unterhaltungsmedien gerne gepflegt wird ist das des genialen, verschrobenen Erfinders, der Maschinen schafft, die menschliche Beschränkungen auf geheimnisvolle Weise aufheben.

Etwas nüchterner betrachtet wird mit dem Begriff Kreativität ganz allgemein die Fähigkeit Neues zu erschaffen beschrieben. Sieht man von detaillierteren Definitionen und Umschreibungen des Begriffs „Neuigkeit“ ab, wird Kreativität in der überwiegenden Zahl der Literaturstellen auf diese Weise erklärt². Für den Bereich der Kunst mag diese einfache Definition gerade noch ausreichen, für die Technik sicher nicht: Kreativität als zweifelsohne positiver Begriff beinhaltet eine Wertung, der der Neuigkeitsgrad einer Erfindung alleine nicht gerecht werden kann. Eine Maschine, die zwar neuartig aber nicht funktions-

¹ Man kann hier unterstellen, dass sie weniger anerkannt sind weil sie so gut sind, sondern weil es im Moment nichts Besseres zu geben scheint.

² Referenzen für diese Definition können nach MAYER (2003, S.5) z.B. Ulrich (1975, S.18), DUDEN, BROCKHAUS, BRODBECK (1995, S.4), ARNOLD ET AL (1987) sein.

fähig oder in irgendeiner Weise nützlich ist, werden wir sicherlich nicht auf einen kreativen Prozess zurückführen, sondern eher als Spinnerei abtun. In technischem Zusammenhang muss die Kreativität also um das Kriterium der Angemessenheit oder Nützlichkeit erweitert werden¹. Technisch kreativ² waren wir nur, wenn wir etwas Neues geschaffen haben, das einen Nutzen aufweist, in der Regel also die Lösung für ein konkretes Problem darstellt³.

Was bedeutet eigentlich „neu“? Sprachlich beziehen wir den Begriff „neu“ überwiegend auf Objekte. So war der 30 Jahre nach seiner Patentierung durch Walter Lindner auf dem Internationalen Automobilsalon in Genf 1981 vorgestellte Airbag für Kraftfahrzeuge ohne Zweifel neu. Zerlegen wir den Airbag in seine Subsysteme, stoßen wir allerdings ausschließlich auf Altbekanntes: Einen Stoß durch ein Kissen abzufangen ist nicht neu – wir sitzen deshalb im Auto auf gepolsterten Sitzen. Luftgefüllte Kissen: Seit langem bekannt. Gaserzeugung durch Verbrennung von Natriumacid eine alte Erfindung und in jedem Feuerwerkskörper realisiert. Die verwendeten Materialien? Älter als die Konstrukteure. Die Neuigkeit eines technischen Systems basiert also nicht auf der Neuigkeit seiner Objekte, sondern auf deren Relationen: Neu am Airbag war, den Aufprall der Insassen eines Autos bei einem Unfall durch ein Kissen abzufangen. Neu war aufgrund der Erfordernisse in einer Crash-Situation die Notwendigkeit, den Airbag in Sekundenbruchteilen mittels einer Explosion aufzublasen. Der Sprengstoff Natriumacid wurde vorher vermutlich nie dazu benutzt, ein Kissen aufzublasen. Spiegelt man also den Neuigkeitsbegriff auf die technische Kreativität zurück, bedeutet dies konkret, dass das Ergebnis eines kreativen Prozesses ein technisches System sein muss, in dem Bekanntes in bislang unbekannter Weise verknüpft wird, um ein Problem zu lösen. Ist die Art der Kombination von Wechselwirkungen bekannt, spricht man häufig auch von einer bekannten Arbeitsweise oder einem Prinzip.

Von einem Problem sprechen wir dann, wenn ein unerwünschter Ausgangszustand nicht ohne das Überwinden einer Barriere in den erwünschten Endzustand überführt werden kann (DÖRNER 1987). Wurde ein technisches Problem identifiziert, können zu seiner Lösung zwei Strategien herangezogen werden: Liegt bereits ein (unzulängliches) System vor, kann dieses optimiert werden. Dazu ist das System unbedingt auf physikalischer Ebene zu analysieren. Das ist notwendig, da eine Optimierung in der Regel eine quantitative Veränderung von Systemparametern erfordert. Mit einer Optimierung lassen sich zwar trefflich

¹ Drevdahl (übersetzt in Schlicksupp 1989) fordert, dass das kreative Ergebnis nützlich und zielgerichtet sein muss. Nach Mayer (2003, S. 5) „...die umfassende und allgemein anerkannte Definition der Kreativität...“.

² Sobald im Folgenden der Begriff „Kreativität“ auftaucht, ist darunter immer „technische Kreativität“ mit ihrer eigenen Definition zu verstehen; Auf das charakterisierende Adjektiv wird der besseren Lesbarkeit halber verzichtet.

³ Einen Überblick über bekannte Definitionen des Kreativitätsbegriffs finden sich in SIKORA 2001, S. 10ff.

Probleme lösen¹, etwas Neues haben wir damit allerdings nicht geschaffen. Existiert ein das Problem lösende System nicht, oder ist das bestehende System mit einer Optimierung nur kurzfristig dazu in der Lage, muss also etwas Neues geschaffen werden.

Das Neue als Kombination von Altbekanntem basiert auf der Verknüpfung von Information und Wissen. Wissen bezeichnet einen Erkenntnisstand, also die Sicherheit eines Individuums bezüglich der Kenntnis von Gegenständen oder Vorgängen (PRECHTL 1999). Aus Daten wird Information, sobald sie der Wahrscheinlichkeit der Aufhebung von Unsicherheit dienen (FAVRE-BULLE 2001, S.36), demzufolge helfen, Wissen zu generieren. Oberflächlich betrachtet könnte man nun auf die Idee kommen, dass die Lösung eines Problems zwar aufwändig aber nicht wirklich schwierig ist. Verknüpfungen von Wissen zu generieren und unter den Verknüpfungen dann bezüglich der Problemstellung zu selektieren erscheint einfach, sofern die Rechenleistung von Computern ausreichend sein wird, sogar automatisierbar. Aber Spekulationen beiseite: Der Ort, an dem wir Wissen verknüpfen, ist heute immer noch unser Gehirn – und gerade hier herrschen signifikante Restriktionen, die die vermeintlich einfache Verknüpfung von Wissen derart erschweren, dass wir mit dem Begriff Kreativität immer noch etwas Geheimnisvolles, Geniales assoziieren.

¹ Tatsächlich kann man in der Industrie häufig beobachten, dass mit blindem Aktionismus und mit hohem Aufwand und Risiko Neuentwicklungen losgetreten werden, obwohl man das vorliegende System in seinem Verhalten noch nicht verstanden hat. So wird das Systempotenzial gerne übersehen und das naheliegendste, nämlich eine oft einfache Optimierung leistungsbestimmender Subsysteme bleibt unangetastet.

3 Das menschliche Gedächtnis

In Kapitel 3 wird ein Überblick über die Arbeitsweise des menschlichen Gedächtnisses gegeben. Problemlösungsprozesse werden allgemein als Prozesse der Informationsverarbeitung definiert. Das Medium, in dem Information aufgenommen, transformiert, gespeichert und wieder abgerufen wird, ist unser Gedächtnis. Ein guter Grund also, „den Ort des Geschehens“ etwas näher zu betrachten. Gedächtnisforschung ist so alt wie die Psychologie. Dementsprechend umfangreich sind ihre Befunde. Die Beschreibung der Informationsverarbeitung innerhalb verschiedener Gedächtnismodelle wird durch einen kurzen Exkurs in den Bereich der Neurobiologie erweitert. Hierdurch wird deutlich werden, dass auch psychologische Paradigmen noch weit davon entfernt sind, eine vollständige Erklärung über die Funktionsweise unseres Gehirns zu liefern. Abschließend soll nach einer Verknüpfung von Problemlösungsprozessen mit Eigenschaften unseres Gedächtnisses eine Rückspiegelung der gewonnenen Erkenntnisse auf Informationsverarbeitungsprozesse in technischem Umfeld versucht werden.

3.1 Gedächtnismodelle

Das Gedächtnis ist ein hypothetisches Konstrukt, das sich unserer direkten Beobachtung entzieht. Abstrakt betrachtet lassen sich die drei Grundfunktionen *einprägen* (enkodieren, kodieren), *behalten* und *abrufen* von Information identifizieren. Letztlich geht es bei der Gedächtnispsychologie – unabhängig von Perspektiven und zugrundeliegenden Paradigmen – mit unterschiedlichen Gewichtungen um die Analyse dieser drei Aspekte.

Gedächtnismodelle lassen sich grob in Mehrspeichermodelle und Mehrebenenmodelle einteilen. Mehrspeichermodelle führen unterschiedliche Gedächtnisleistungen auf den Zugriff auf verschiedene Gedächtnisspeicher zurück. Mehrebenenmodelle dahingegen erklären unterschiedliche Gedächtnisleistungen durch Unterschiede in der Reizverarbeitung. Der von CRAIK & LOCKHART 1972 vorgeschlagene Mehrebenenansatz („levels of processing“), der von einer rein hierarchischen Informationsverarbeitung (flach nach tief, vgl. Abbildung 3-1) ausgeht, gilt als weitgehend widerlegt. Die Revision dieses Modells (CRAIK & SIMON 1980) durch die Einführung der sog. „Elaboration“, die die rein qualitative Informationsverarbeitung des hierarchischen Modells durch einen quantitativen Aspekt

erweitert¹, löst das ursprünglich postulierte Modell begrifflich auf (SCHERMER 1998, S. 118 & 137ff).

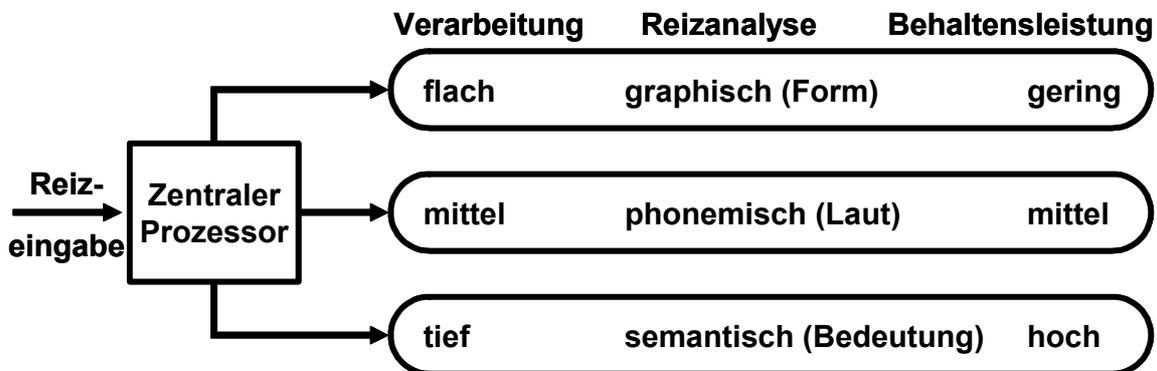


Abbildung 3-1: Mehrebenenmodell (nach SCHERMER 1998, S. 137).

Im Folgenden soll näher auf aktuelle Mehrspeichermodelle eingegangen werden: Seit Beginn der Gedächtnisforschung wurden zahlreiche dieser Modelle entwickelt. Ähnlich wie die unterschiedlichen Vorgehensmodelle in der Konstruktionsmethodik sind alle Gedächtnismodelle nicht falsch und gleichzeitig nicht richtig. Vielmehr werden einzelne Beobachtungen, die auf das Arbeitsverhalten des Gedächtnisses zurückschließen lassen, durch bestimmte Modelle jeweils besser oder eben schlechter abgebildet. Das älteste Mehrspeichermodell, das auch heute noch den „kleinsten gemeinsamen Nenner“ darstellt, ist das Zweispeichermodell, das ein Kurzzeitgedächtnis und ein Langzeitgedächtnis unterscheidet. Beide Gedächtnistypen sind keineswegs klar voneinander trennbar. Die primär diskriminierenden Eigenschaften dieser Typen sind die Kapazität der Informationsspeicherung, die Haltezeit², sowie die Kodierung³ der Information. Im Kurzzeitgedächtnis befindliche Information wird durch Wiederholungsmechanismen („rehearsal“) in das Langzeitgedächtnis überführt. In der entgegengesetzten Richtung wird Information aus dem Langzeitgedächtnis in das Kurzzeitgedächtnis zurück transferiert und dort verarbeitet (vgl. Abbildung 3-2).

¹ Elaboration bezieht sich auf die Ausdehnung oder Reichhaltigkeit der auf jeder Ebene oder Tiefe erfolgenden Informationsverarbeitung.

² Die Haltezeit charakterisiert einen Speichertyp durch die Dauer, für die ein Gedächtnisinhalt verfügbar ist. Endet die Haltezeit, kann man von „Vergessen“ sprechen.

³ Je nach Speichertyp können verschiedene Verschlüsselungen (Kodierungen) der Information (auch als Repräsentationen bezeichnet) identifiziert werden. Die Spanne reicht dabei von nahezu unkodierter, also reiznaher Information, wie z.B. einem Lichtreiz bis zu hochgradig kodierten Gedächtnisinhalten wie z.B. Begriffen (Haus, Langeweile, etc.).

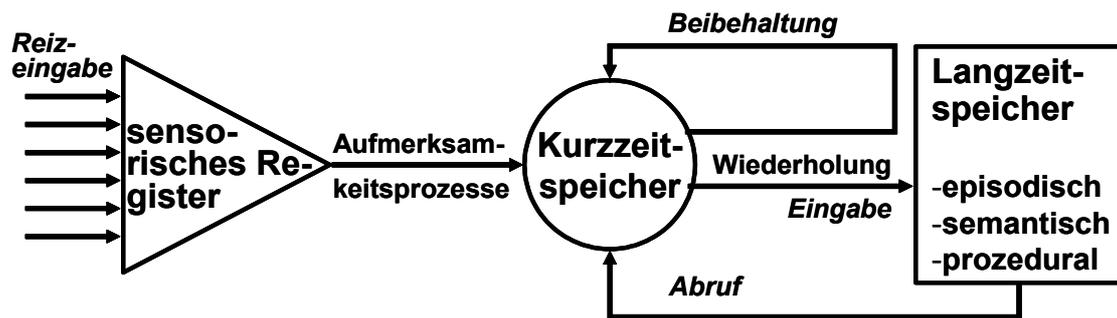


Abbildung 3-2: Mehrspeichermodell (nach SCHERMER 1998, S. 118).

3.2 Kurzzeitgedächtnis

Dem Kurzzeitgedächtnis¹ lassen sich weitere Gedächtnistypen zuordnen. Je nach Auffassung werden diese Typen in der Literatur auch als „eigenständige“ Speicherarten behandelt. Die Zusammenfassung der unterschiedlichen Speicher zu einem Kurzzeitgedächtnis ist eher systematischer Natur, da sie sich in einigen Bereichen stärker ähneln als Subsysteme des Langzeitgedächtnisses: Inhalte des Kurzzeitgedächtnisses sind in der Regel bewusst. In diesem Zusammenhang spricht man auch von „psychologischer Gegenwart“². Die Kapazität ist wie die Haltezeit relativ stark beschränkt. Inhalte sind dort zwischen wenigen Sekundenbruchteilen bis hin zu einer Stunde gespeichert. Charakteristisch für die Beibehaltung der Information in diesen Speichern ist die „erhaltende Wiederholung“³. Will man also eine Telefonnummer nicht kurzfristig vergessen, muss man sie lediglich permanent wiederholen. Diese Form der Wiederholung ist nicht zu verwechseln mit der für Lernprozesse, also der Überführung von Information vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis notwendigen Wiederholungen. Für letztere wird eine „elaborierende Wiederholung“ benötigt, bei der weniger die Zahl der Wiederholungen, als vielmehr die Art und Weise ihrer Durchführung notwendig ist. Elaborierende Wiederholungen führen gemäß dem Mehrebenenmodells zu einer „tieferen Verarbeitung“ mit der damit verbundenen besseren Behaltensleistung (BOLZ 2002; SCHERMER 1998).

¹ Auch primäres oder unmittelbares Gedächtnis.

² Dementsprechend wird Information des Langzeitgedächtnisses aufgrund des Entzugs des Bewusstseins – Information muss zur Bewusstmachung erinnert werden – der „psychologischen Vergangenheit“ zugeordnet.

³ Auch maintenance rehearsal.

3.2.1 Ultra-Kurzzeitgedächtnis

Das Ultra-Kurzzeitgedächtnis speichert Sinneseindrücke für ca. eine Sekunde. Da Information hier unkodiert und noch nicht bewusst vorliegt, wurde dieser Bereich in der Vergangenheit nicht dem Kurzzeitgedächtnis zugeordnet, sondern vielmehr eigenständig als sensorisches Register¹ bezeichnet (ATKINSON & SHIFFRIN 1968). Die Haltezeit der hier gespeicherten Information beträgt in etwa eine halbe Sekunde. Gespeichert werden sämtliche einlaufende Reiztypen. Exakt nachgewiesen sind dabei visuelle und akustische Sinneseindrücke, die die Begriffe *iconic* und *echoic memory* prägten. Diese Gedächtnisstrukturen sichern durch eine sehr kurzzeitige Speicherung sehr umfangreicher Information² die vollständige Weiterleitung der aufgenommenen Reize in andere Gedächtnisbereiche. Aufgrund der geringeren Kapazität der für die Verarbeitung nachfolgenden Bereiche muss davon ausgegangen werden, dass zum Abruf von Information aus dem sensorischen Speicher Aufmerksamkeitsprozesse ablaufen müssen. Dadurch werden aus der Fülle von Sinneseindrücken (z.B. während des Bewegens eines Kfz im Verkehr einer Großstadt) die relevanten extrahiert, während irrelevante nicht weitergeleitet werden. Neuere Forschungen stützen die Zweifel an der Existenz des sensorischen Gedächtnisses als eigenständige Struktur aufgrund des Nachweises von kodierter Information, die aber als abgrenzendes Merkmal zum Kurzzeitgedächtnis definiert wurde (BADDELEY 1997; SCHERMER 1998).

Die Filterung von Information durch Aufmerksamkeitsprozesse ist aus rein ökonomischen Gesichtspunkten notwendig. Unser Gehirn kann abhängig von ihrer Kodierung lediglich eine gewisse Anzahl an Informationseinheiten handhaben (siehe Kapitel 3.2.2). Im Bereich des Ultra-Kurzzeitgedächtnisses muss wohl von einer „digitalen“ Filterung ausgegangen werden: Information wird hier entweder weitergeleitet, oder eben nicht. In weiter elaborierter Form wird die Information für eine ökonomischere Handhabung z.B. durch Abstraktion und damit Klassifikation reduziert. Es ist nachvollziehbar, dass Informationen praktisch beginnend mit unserer Wahrnehmung durch Filterfunktionen und reduzierende Weiterverarbeitung „verloren gehen können“. Gerade Methoden des Systems Engineering setzen an dieser Eigenheit unseres Gedächtnisses an (vgl. Kapitel 5).

3.2.2 Unmittelbares Gedächtnis

Das unmittelbare Gedächtnis steht synonym für die ursprüngliche Interpretation des Kurzzeitgedächtnisses. Hier werden 7 +/- 2 Gedächtniseinheiten (auch *chunks*) für 30 Sekunden

¹ Später auch sensorisches Gedächtnis.

² Tatsächlich ist die Kapazität des sensorischen Gedächtnisses deutlich größer als die des nachfolgenden Kurzzeitgedächtnisses.

aufbewahrt (BOLZ, 2002). Die Gedächtniseinheit ist dabei nur schwer normierbar. So können geübte Schachspieler deutlich mehr tatsächlich vorkommende Figurenpositionen im Kurzzeitgedächtnis behalten, als mittelmäßig geübte oder ungeübte Spieler. Es wird angenommen, dass infolge der umfangreicheren Erfahrungen mit dem Schachspiel geübte Spieler im Langzeitgedächtnis viele Informationen gespeichert haben, die eine Strukturierung der Reizvorlage und damit eine größere Zusammenfassung von Einzelelementen ermöglichen (SCHERMER 1998). Dass die Strukturierung von Information ihre Speicherung quantitativ beeinflusst, ist relativ einfach nachvollziehbar: Versucht man sich (auch durch Wiederholungen) eine neunstellige Telefonnummer kurzzeitig zu merken oder einer anderen Person zu diktieren, gelingt dies einfacher, wenn man die Ziffernfolge in Blöcke von zwei bis drei Ziffern mit einer dazwischenliegenden Pause zerteilt. Die Ziffernblöcke unterscheiden sich durch Klang und Rhythmus. Die gesamte Nummer ist dann als Folge von spezifisch „klingenden“ Ziffernblöcken repräsentiert, statt als Folge einzelner Zahlen. Der „Klang“ der Ziffernblöcke lässt während der Pausen zwischen ihnen auf die die Blöcke bildenden Ziffern schließen. (BADDELEY 1997)

Im Gegensatz zum Ultra-Kurzzeitgedächtnis liegen im unmittelbaren Gedächtnis Informationen nicht den genuinen Reizen entsprechend, sondern in kodierter Form vor. Nach SCHERMER (1998) legten frühe Forschungsbefunde eine akustische Informationsverschlüsselung nahe (um 1964). Durch Untersuchungen mit gehörgeschädigten Kindern konnte nachgewiesen werden, dass nicht allein die Lautwahrnehmung, sondern auch die Lauterstellung (Artikulation) für die Kodierung relevant ist¹. Diese sprachlich orientierte Kodierung ist durchaus nachvollziehbar. Wenn wir denken, oder versuchen uns etwas kurzzeitig zu merken, führen wir quasi ein stummes Selbstgespräch – in der Literatur auch „subvokales Sprechen“ genannt - durch. Neben der akustisch-artikulatorischen Kodierung lassen sich noch andere Repräsentationsformen wie z.B. bedeutungshaltige (semantische) und sensorische (visuelle, olfaktorische) für das unmittelbare Gedächtnis nachweisen. Dass der akustisch-artikulatorischen Kodierung dabei eine besondere Rolle zukommt, lässt sich wiederum mit dem Versuch sich eine Telefonnummer kurzzeitig zu merken zeigen: Man kann sich die Nummer visuell (also stumm als Bild) merken. Sehr viel besser für die Behaltensleistung ist allerdings, sich die Nummer subvokal vorzusprechen. (BADDELEY 1997).

Der Abruf von Information aus dem unmittelbaren Gedächtnis erfolgt je nach Aufgabenart und Vorkenntnis auf unterschiedliche Arten. Eine nachweisbare Möglichkeit ist eine sehr schnelle, vollständige und sequenzielle Durchmusterung² des Gedächtnisinhaltes. Dem

¹ Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer akustisch-artikulatorischen Repräsentation im Kurzzeitgedächtnis.

² Ein solcher Durchmusterungsprozess findet dann statt, wenn Teilelemente einer Menge identifiziert werden sollen, die im unmittelbaren Gedächtnis gespeichert ist.

entgegen lassen sich selbstbeendende (kontrollierte) Suchprozesse beobachten, bei denen explizit keine vollständige Durchmusterung erfolgt (SCHERMER 1998).

In der Literatur der Konstruktionsforschung ist das Modell des Kurzzeitgedächtnisses mit seiner quantifizierbaren Kapazität sehr populär. Richtig ist hierbei sicherlich die Notwendigkeit der Strukturierung von Information zu betonen. Methoden wie Clusterbildung, hierarchische Funktions- und Baustrukturen und einige mehr dienen dazu, größere Informationsmengen handhabbar zu machen (vgl. auch Kapitel 4.2 und 4.3). Dem entgegen wird die Beschränkung des „Arbeitsspeichers“ unseres Gedächtnisses auf gerade mal sieben Chunks der tatsächlichen Leistungsfähigkeit bei weitem nicht gerecht. Das Entwickeln komplexer technischer Produkte ist in seinem kognitiven Aufwand sicherlich bei weitem nicht mit dem Merken einer Telefonnummer zu vergleichen.

Da der Inhalt des unmittelbaren Gedächtnisses nicht zwangsläufig mit der aktuellen, bewußten Gedankenarbeit zu tun haben muss, wurde dieses Gedächtnismodell von BADDELEY (1997) um ein sog. Arbeitsgedächtnis erweitert. Beobachtungen, dass Fakten und Ereignisse bis zu einer Stunde auch ohne erhaltende Wiederholungen aufbewahrt werden können, die aber auch nicht ins Langzeitgedächtnis übergehen, lässt sich mit der Erweiterung des Modells um ein Protokollgedächtnis oder auch mittelfristiges Gedächtnis erklären (DÖRNER 1996).

3.2.3 Arbeitsgedächtnis

Bereits die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass das Kurzzeitgedächtnis nur schwer einheitlich beschreibbar ist. Experimente, die durch ihre Aufgabenstellung die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses hätten überfordern sollen, führten trotz dieser prognostizierten Überforderung bei den Versuchspersonen keinen deutlichen Leistungsabfall in der Aufgabenbearbeitung herbei. Basierend auf dieser bis dato bestehender Paradigmen widersprechenden Erkenntnis schlägt BADDELEY (1997) das Modell des Arbeitsgedächtnisses vor: In diesem Modell übernimmt eine noch wenig erforschte Leitzentrale¹ die Aufgabe der Aufmerksamkeitslenkung, sowie der Koordination und Integration weiterer Hilffssysteme. Bei diesen handelt es sich um eine sog. phonologische Schleife² und einen bildhafteräumlichen Notitzblock³ (vgl. Abbildung 3-3).

¹ central processor / central executive

² phonological loop

³ visuo-spatial sketchpad. In deutschsprachiger Literatur häufig falsch als “visuo-spatial scratch-pad” zitiert.

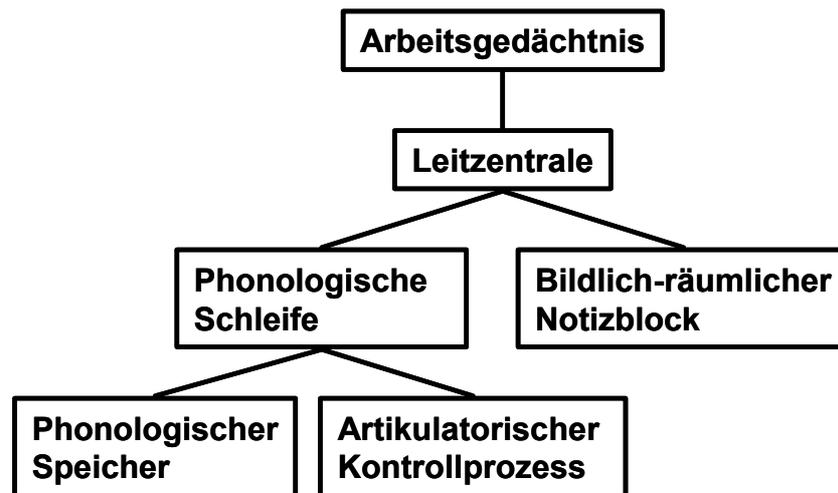


Abbildung 3-3: Hierarchische Darstellung des Aufbaus des Arbeitsgedächtnis nach BADDELEY (1997).

Modelle des Arbeitsgedächtnisses erfahren derzeit ein relativ großes Interesse innerhalb der Forschung. Dementsprechend existieren bereits deutlich komplexere Modelle als die im Folgenden dargestellten (CONWAY 1997). Der Detaillierungsgrad dieser Modelle und ihre auf spezifischen Befunden basierenden Unterschiede, die auch noch aus forschungsmethodischer Sicht diskutiert werden, führen allerdings für die Intention dieser Arbeit zu weit.

Phonologische Schleife

Die phonologische Schleife ähnelt in ihrer Funktionsweise frühen Modellen des unmittelbaren Gedächtnisses. Sie wird gebildet durch einen phonologischen Speicher, der sprachliche Information mit einer Haltezeit von ca. zwei Sekunden aufnehmen kann. Durch einen artikulatorischen Kontrollprozess, der im Wesentlichen auf subvokalen Wiederholungen beruht, wird dieser Speicherinhalt auch über längere Zeit erhalten. Dieser Kontrollprozess ist allerdings auch mit der Aufmerksamkeitslenkung verknüpft. Subvokale Wiederholungen hemmen unter Umständen die Aufnahme von sprachlicher Information („der Speicher ist voll“). Andererseits kann durch die Aufnahme externer Reize die auf Wiederholungen beruhende Schleife der Informationsspeicherung unterbrochen werden. Visuelle Reize interferieren dabei nicht in demselben Maße wie sprachliche. Dieser Effekt ist gut bei Leuten zu beobachten, die z.B. Gegenstände zählen. Ruft man diesen Leuten Zahlen zu, die nicht dem aktuellen Stand im Zählprozess entsprechen, ist es dem Zählenden kaum mehr möglich ohne Fehler fortzufahren. Auch lautes Zählen bringt hierbei keine signifikante Verbesserung. Noch besser lässt sich der Effekt beobachten, wenn dieser Prozess des Zählens langsam abläuft, zur Speicherung der letzten Ziffer also subvokale Wiederholungen nötig sind. Versucht man den Prozess durch die Präsentation von Bildern zu stören, hat dies in der Regel kaum Fehlleistungen beim Zählen zu Folge. Die Behaltensleistung sol-

cher Störfaktoren ist allerdings in diesen Fällen eher schlecht, es kann damit auf eine Inhibition der Aufnahme dieser Reize geschlossen werden.

Bildhaft-räumlicher Notizblock

Letztere Beobachtungen legen eine gewisse Trennung bei der Verarbeitung bildlicher und sprachlicher Information nahe. So definiert BADDELEY (1997) auch den bildhaft-räumlichen Notizblock als eigenständiges Hilfssystem des Arbeitsgedächtnisses. In ihm werden sowohl bildliche als auch räumliche Information („was und wo“) scheinbar unabhängig voneinander abgelegt. Die dort abgelegten Informationen können der Wahrnehmung oder dem Gedächtnis entstammen. Ein herausragender Unterschied zur phonologischen Schleife ist, dass sehr gute Behaltensleistungen auch über längere Zeiträume hinweg ganz ohne (bewusste) Wiederholungen möglich sind. Die scheinbar größere Leistungsfähigkeit dieses bildlich-räumlichen Speichers kann an folgendem Alltagsbeispiel verdeutlicht werden: Die bekannten web-basierten Routenplaner bieten dem Nutzer als Navigationshilfe eine sequentielle, sprachliche Beschreibung (nach 100 m rechts ...) sowie eine Karte mit dem eingezeichneten Weg. Versucht man allein mit der sprachlichen Beschreibung zu navigieren, ist man gezwungen, des Öfteren einen Blick auf diese Beschreibung zu werfen, da der Speicherinhalt des Arbeitsgedächtnisses allem Anschein nach nicht ausreicht die gesamte beschriebene Route zu fassen. Auf die bildliche Beschreibung des Weges muss man deutlich seltener zurückgreifen, hier sind allem Anschein nach also größere Einheiten gespeichert. Begründbar mag dies auch durch das unterschiedliche entwicklungsgeschichtliche Alter der Notwendigkeit zur Verarbeitung von Sprache und bildlich-räumlichen Reizen sein.

Bezüglich visueller Gedächtnisteile existieren zahlreiche Konzepte. Trotz einiger belegter funktionaler Übereinstimmungen dieser Konzepte ist es aus wissenschaftlicher Sicht nicht zulässig, diese zu einem einheitlichen Konzept zu integrieren. Es sollen dennoch an dieser Stelle einige Eigenschaften bildlich-räumlicher Repräsentationen benannt werden, die von HAGENDORF (1995) zusammengefasst wurden: Bildlich-räumliche Repräsentationen sind integrativer Bestandteil menschlichen Denkens. Dies umso mehr vor dem Hintergrund, dass sprachliche in bildlich-räumliche Repräsentationen und umgekehrt überführt werden können. Bildlich-räumliche Repräsentationen sind sehr ökonomisch. Durch die schnelle und flexible Manipulierbarkeit wird der Behaltensaufwand minimiert. Daraus leitet sich ihre Funktion bei der „online Überprüfung“ von Hypothesen ab. Die Wechselwirkung wahrnehmungsbezogener und wissensbasierter Prozesse ist belegt. Der temporäre Charakter dieser Repräsentationen folgt aus der sequentiellen Generierung aus verbalbegrifflichem Wissen. Bildlich-räumliche Repräsentationen weisen des Weiteren eine hohe Komplexität aber auch Strukturierung auf. Man geht von einer top-down-Bildung dieser Repräsentationen aus. Sie gelten als Simulation von Wahrnehmungserlebnissen und geben damit die Kontinuität von Bewegung und Zeit in einer physikalischen Welt wieder. Auf-

grund letzterer Eigenschaft liegt eine hohe Affinität zu den episodischen Bereichen des Langzeitgedächtnisses nahe.

Bildlich-räumliche Repräsentationen nehmen ohne Zweifel eine besondere kognitive Rolle ein. Diese spiegelt sich nicht zuletzt auch in der Binsenweisheit „ein Bild sagt mehr als tausend Worte“ wieder. Beschilderungen in der Öffentlichkeit sind aus diesem Grund in der Regel nicht-sprachlich. So vorteilhaft bildliche Darstellungen scheinen mögen, führen sie in kreativen Prozessen durchaus auch zu Problemen, die in bestimmten Situationen die Bevorzugung sprachlicher Information nahe legen. Anhand eines Fallbeispiels in Kapitel 4.5.1 soll diese Problemstellung näher betrachtet werden.

Leitzentrale

Die auf die beiden beschriebenen Hilfssysteme zurückgreifende Leitzentrale steht noch sehr in den Anfängen ihrer Erforschung. Die Funktionsweise dieses Systems wird eher als Aufmerksamkeitslenkung denn als Speicher charakterisiert. Bei Aufmerksamkeitsprozessen kann man die Phänomene Erwartungshaltung¹, selektive Wahrnehmung², Parallelverarbeitung³ und Automatismen⁴ beobachten:

Einen Lenkung der Aufmerksamkeit durch eine Erwartungshaltung lässt sich z.B. beim Warten an einer roten Ampel auf die Grünphase beobachten. Ein anderes Beispiel kann die Überwachung eines Radarschirms sein. In beiden Beispielen wird der allgemeine Informationsinput zugunsten des erwarteten Reizes reduziert.

Durch selektive Wahrnehmung wird es uns ermöglicht selbst innerhalb einer Reizklasse irrelevante Information von relevanter zu trennen. Jederzeit nachvollziehbar ist das auf jeder Party mit „Stimmengewirr“: Es fällt selbst bei hohem Lärmpegel relativ leicht einzelne Stimmen zu identifizieren und Gespräche zu verfolgen. Möglich dürfte dies vor allem durch unser Vermögen zum „räumlichen Hören“ sein. Hält man sich in der beschriebenen Situation ein Ohr zu, fällt einem die Selektion sehr schwer. Falls man sich dabei in einem Raum befindet, kann man sogar das dadurch erzeugte Echo an dem „blechernen“ Klang der Stimmen zu erkennen, das man mit beiden Ohren gar nicht wahrgenommen hat.

Parallelverarbeitung ist als reine Leistung des Kurzzeitgedächtnisses praktisch nicht möglich. Es ist z. B. nahezu unmöglich, mit der einen Hand im 3/4-Takt und gleichzeitig mit der anderen Hand im 4/4-Takt auf einen Tisch zu schlagen. Andererseits kann ein Klavierspieler mit beiden Händen zwei Stimmen eines Liedes wiedergeben. Parallelverarbeitung

¹ Im Original (BADDELEY 1997): vigilance

² Im Original (BADDELEY 1997): perceptual selection

³ Im Original (BADDELEY 1997): dual task performance

⁴ Im Original (BADDELEY 1997): automaticity

ist nur mit einiger Übung möglich. In diesem Fall muss man aber von einer Unterstützung durch Teile des Langzeitgedächtnisses ausgehen. Automatismen sind eben solche Phänomene des Langzeitgedächtnisses. Der geübte Autofahrer hat im Normalfall wenig Probleme während der Fahrt eine Unterhaltung zu pflegen, und gleichzeitig ein ihm vertrautes Auto technisch korrekt zu bedienen. Die gleichzeitige Bewältigung des Verkehrsgeschehens ist allerdings eingeschränkt, da die sich stetig verändernden oder gar unbekanntem Umwelteinflüsse keine Unterstützung durch unbewusst arbeitende Teile des Gedächtnisses abgedeckt werden können. Dies erklärt auch das in Deutschland etablierte Schild in öffentlichen Verkehrsmitteln, das ein Ansprechen des Fahrers untersagt.

Automatismen finden in der Literatur der Konstruktionsforschung tendenziell nur sehr wenig Anklang. Da sie wie oben dargestellt aber auch schlichtweg notwendig sind und prinzipiell zu einer Effizienzsteigerung dienen können, wäre es wohl sinnvoller, statt sie zu verdammen, eine Wahrnehmung und Weiterentwicklung dieser Prozesse zu fordern. Die Selbstreflexion ist hierzu sicherlich das derzeit beste aller Mittel (siehe dazu auch die Anwendung des Münchener Vorgehensmodells (LINDEMANN 2003B) in Kapitel 6.1).

BADDELEY (1997) schlägt als Modell für die Funktionsweise der Leitzentrale das von Norman & Shallice (1986) aufgestellte relativ undetaillierte Modell zur Handlungskontrolle vor (SAS model). In diesem werden aktivierende Informationen aus der Wahrnehmung in einer „schema control unit“ durch zwei unterschiedliche Mechanismen selektiert: Durch das sog. „contention scheduling“ ist es möglich, Selektionen automatisch vorzunehmen. Dieser Mechanismus wird in vertrauten Situationen aktiv, die weitgehend automatisiertes Vorgehen (Schematas) erlauben. Sollte es nicht möglich sein, auf vorgefertigte Lösungsmöglichkeiten zurückzugreifen, und somit das Planen und Treffen von Entscheidungen, die Beseitigung von Problemursachen, oder ähnlichem notwendig sein, wird das sog. „supervisory attentional system“ aktiv. Dieser Mechanismus ist über das contention scheduling dominierend und spiegelt den „freien Willen“ einer Person wieder. Die selektierten Informationen gelangen in Folge in ein „effector system“ (vgl. Abbildung 3-4).

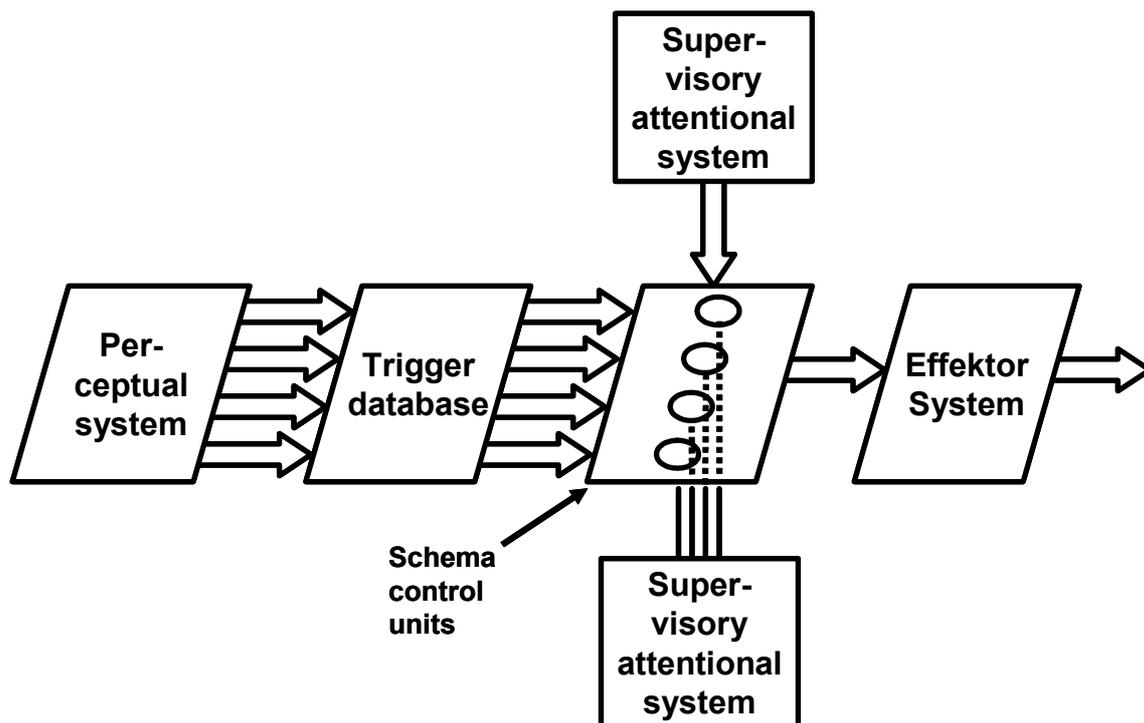


Abbildung 3-4: Leitzentrale (SAS model) nach BADDELEY 1997.

3.2.4 Protokollgedächtnis

DÖRNER (1996) definiert ein Protokollgedächtnis. Dieser Speicher bewahrt mehr oder weniger vollständig zeitlich geordnete kognitive Aktivität auf. Es handelt sich damit um episodische Gedächtnisinhalte, vergleichbar mit denen, die für das Langzeitgedächtnis bekannt sind (nähere Erläuterungen zum episodischen Gedächtnis im Abschnitt „Langzeitgedächtnis“). Die Abgrenzung zum Langzeitgedächtnis begründet sich einerseits in der begrenzten Haltezeit in diesem Speicher von Minuten bis Stunden, sowie andererseits in der nachweisbar anderen Kodierung seiner Inhalte. Letztgenannter Unterschied lässt sich am Phänomen der „retrograden Amnesie“ identifizieren: Bei Hirnverletzungen erinnern sich Patienten nicht mehr an den 30 Minuten dauernden Zeitraum vor der Verletzung. Dies deutet darauf hin, dass in dieser Zeit wohl ein Konsolidierungsprozess stattfindet, bei dem zumindest ein Teil der Inhalte des Protokollgedächtnisses umkodiert wird und ins Langzeitgedächtnis zur dauerhaften Speicherung übergeht. Die Speicherkapazität des Protokollgedächtnisses dürfte um einiges größer sein als die des Kurzzeitgedächtnisses, ist aber im Gegensatz zum Langzeitgedächtnis deutlich begrenzt und darüber hinaus flüchtig.

Die Inhalte des Protokollgedächtnisses stellen unsere unmittelbare Vergangenheit dar. Damit ist das Protokollgedächtnis essentiell für die Orientierung in der Zeit, die für ein geordnetes Handeln unverzichtbar ist. Auch für höhere kognitive Prozesse (Denken und

Problemlösen) stellt der Rückgriff auf die Inhalte des Protokollgedächtnisses ein wichtiges Steuerungsmoment dar, welches insbesondere die Selbstreflexion ermöglicht. (DÖRNER 1996)

3.3 Langzeitgedächtnis

Das Langzeitgedächtnis dient nach KLIX (1980) der zeitstabilen, störresistenten Einlagerung von Information. Dabei sind die wesentlichen Leistungen des Langzeitgedächtnisses das Identifizieren¹, Reproduzieren² und Produzieren³. Im Gegensatz zum Kurzzeitgedächtnis ist das Langzeitgedächtnis hinsichtlich seiner Kapazität nahezu unbegrenzt, seine Inhalte sind aber nicht bewusst, müssen also um verarbeitbar zu sein je nach Gedächtnistyp bewusst gemacht werden (Reproduktion).

Bei der Kodierung von Information im Langzeitgedächtnis ging man zunächst von einer imaginalen und einer verbalen Verschlüsselung aus. Die imaginale (bildliche) oder auch analoge Kodierung stellt trotz ihrer Bezeichnung ein abstrahiertes Bild zur Verfügung, das damit nicht als „Fotografie“ verstanden werden darf. Die verbale Kodierung repräsentiert Information unabhängig von ihrer sensorischen Qualität. Speicherung und Abruf verbal kodierter Information ist nachweisbar deutlich langsamer, als die der imaginal kodierten. Neuere Betrachtungen gehen von einer propositionalen Kodierung im Langzeitgedächtnis aus. Diese ist abstrakt, aber nicht-sprachlich. Ob diese Form der Kodierung neben imaginaler und verbaler existiert oder dieser zugrunde liegt, ist bislang unklar. (SCHERMER 1998)

Ogleich nicht so eindeutig voneinander getrennt wie die Darstellung nach JAFFARD (2002) vermuten lässt, kann das Langzeitgedächtnis in ein explizites und ein implizites Gedächtnis unterteilt werden (vgl. Abbildung 3-5). Das explizite Gedächtnis, dessen Inhalt wir größtenteils bewusst wiedergeben können, lässt sich in ein semantisches Gedächtnis, in dem Fakten gespeichert sind und in ein episodisches Gedächtnis, in dem Ereignisse (Prozesse) gespeichert sind, unterteilen. Das implizite Gedächtnis hält Inhalte bereit, die wir in der Regel zwar aktiv aber unbewusst abrufen und deshalb nur sehr schwer mitteilen können. Implizites Wissen kann an folgendem Beispiel verdeutlicht werden: Hat man einmal das Fahren eines Fahrrades erlernt, ist dieses Wissen praktisch lebenslang verfügbar. Der Prozess des Fahrens verläuft dabei, nachdem wir ihn mehr oder weniger aktiv erlernt ha-

¹ Erkennen aktueller Meldungen

² Wiedergewinnung von Gedächtnisinhalten

³ Umformung alter oder Konstruktion neuer Gedächtnisinhalte. Hier auch Ergebnisse eines logischen Schlusses.

ben, unbewusst. So können wir bewusst eine Richtungsänderung herbeiführen (Kurve), es ist uns dabei aber nicht bewusst, dass wir dazu zunächst den Lenker in die entgegengesetzte Richtung einschlagen, damit der Schwerpunkt von Fahrer und Fahrrad zum Kurveninneren kippt und wir so eine stabile Schräglage erreichen, bei der Kippmoment (aus Schwerkraft resultierend) und Moment aus der Fliehkraft resultierend sich aufheben. Derartiges Wissen oder auch Automatismen sind als Teil des impliziten Gedächtnisses im prozeduralen Gedächtnis abgelegt. Neben diesem lassen sich noch das Priming, die klassische Konditionierung sowie das nicht-assoziative Lernen als Bereiche des impliziten Gedächtnisses identifizieren. Im Folgenden soll auf einige der genannten Bereiche des Langzeitgedächtnisses näher eingegangen werden.

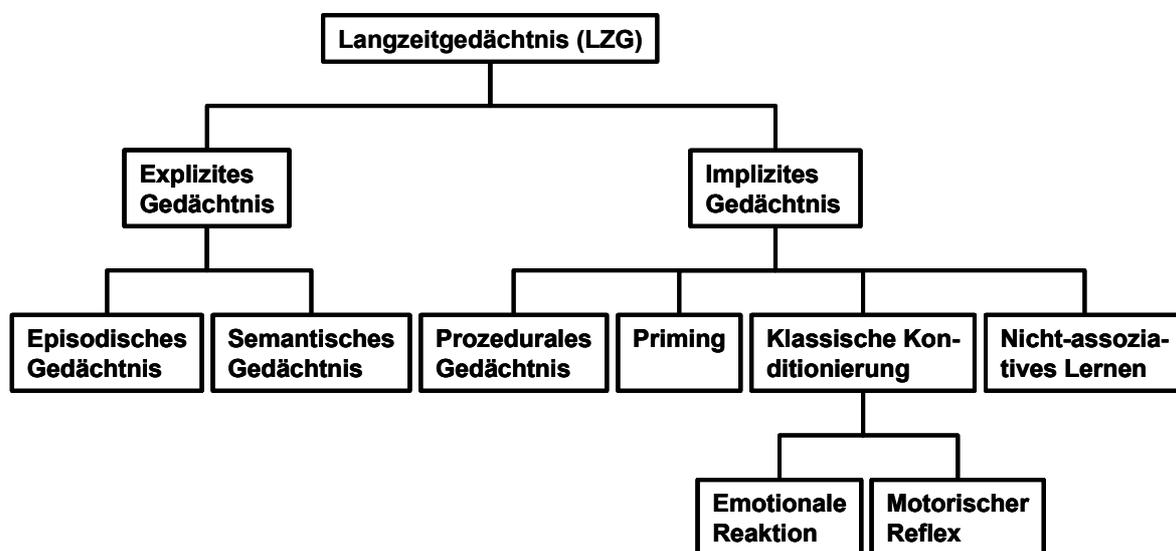


Abbildung 3-5: Aufbau des Langzeitgedächtnisses (nach JAFFARD 2002).

3.3.1 Semantisches Gedächtnis

Das semantische Gedächtnis¹ stellt einen Speicher für Information dar, bei dem im Gegensatz zum episodischen Gedächtnis kontextfreie Information abgelegt ist (Wissen) und damit eine wichtige Rolle für die Prozesse des Schlussfolgerns einnimmt. So dient das semantische Gedächtnis zur Beantwortung inhaltlicher Fragen („was ist, bzw. was bedeutet das?“) und nicht zur zeitlich-räumlichen Einordnung eines Geschehens („wann und wo habe ich das erlebt?“), was die Domäne des episodischen Gedächtnisses ist. Die mit dieser Definition scheinbar sehr scharfe Abtrennung dieser beiden Speicher täuscht über die tat-

¹ auch als Wissensgedächtnis bezeichnet

sächlich sehr starke Verflechtung hinweg: In der Regel wird Wissen zunächst kontextbezogen im episodischen Gedächtnis gespeichert. Das Wissen ist damit zunächst an die während des Erlernens herrschenden Randbedingungen gekoppelt (z.B. Unterrichtsstunde in der Schule). Im weiteren Verlauf kann dieses Wissen vom Kontext gelöst werden und ins semantische Gedächtnis übergehen. Wann und auf welche Weise diese Übertragung erfolgt, ist dabei bis heute ungeklärt.

Die Inhalte des semantischen Gedächtnisses lassen sich am treffendsten in Form von strukturierten Begriffen charakterisieren. Die Begriffsbildung dient dabei zur Reduktion relativ reizorginaler Information zu zusammenfassenden (abstrahierten) Einheiten und ermöglicht dadurch die Integration noch unbekannter Information in bestehendes Wissen. Begriffe sind nicht einzelnstehend, sondern zu Begriffssystemen organisiert. Diese sind hierarchisch strukturiert. Spezielle Begriffe sind also über einen allgemeineren Oberbegriff zusammenfassbar. Bei der Zuordnung von Unter- zu Oberbegriffen lässt sich eine sog. Typikalität identifizieren. So scheint z.B. der Begriff „Rose“ dem Oberbegriff „Blume“ näherstehend, als der Begriff „Chrysantheme“. Die einzelnen Begriffssysteme sind durch Kreuzklassifikation miteinander gekoppelt. Damit kann ein Objekt verschiedenen Begriffssystemen zugeordnet werden. Ob allerdings ausschließlich Begriffe Inhalte des semantischen Gedächtnisses sind (der ursprünglichen Annahme entsprechend) ist heute umstritten. Mit Versuchen ließen sich bildliche Inhalte des semantischen Gedächtnisses nachweisen. BADDELEY (1999, S.160) schlägt eine Speicherung in abstrakter Form vor, die je nach Bedarf in sprachliche oder bildliche Form überführt werden kann. Dieser Ansatz könnte auch als Erklärung für den „tip-of-the-tongue effect“¹ dienen. Versuchspersonen ist in diesen Fällen bewusst, einen Gedächtnisinhalt zu haben, können ihn aber nicht abrufen. Wird der Gedächtnisinhalt präsentiert, wird er sofort als solcher erkannt (BADDELEY 1997).

Die Wissensrepräsentation im semantischen Gedächtnis kann mit den folgenden Modellvorstellungen erfasst werden: Die (umstrittene) Mengenrepräsentation geht von einer Charakterisierung eines Begriffs durch alle ihm zuordbare Objekte aus. Der Begriff „Fahrrad“ würde also durch die Gesamtmenge aller bekannten Fahrradtypen gebildet („Rennrad“, „Mountainbike“, ...). Für die Entscheidung, ob ein Objekt einem Begriff zugeordnet werden kann, müsste also eine sequentielle Durchmusterung aller zu diesem Begriff gehörenden Objekte erfolgen. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass die Zuordnung eines Objekts zu einem Begriff mit einer großen Objektmenge zeitaufwändiger ist, als zu einem Begriff mit einer kleineren. Es existieren hierzu aber auch widersprechende Befunde. Der Prototypenansatz geht im Gegensatz zur Mengenrepräsentation davon aus, dass ein Begriff durch besonders typische Vertreter (Prototyp) gebildet wird. Die Prototypenbildung ist dabei vor allem bei abstrakten Begriffen sehr stark an eine Merkmalsrepräsentation gebunden: Weist ein Objekt mehr mit dem Oberbegriff übereinstimmende Merkmale

¹ im Deutschen als „auf der Zunge liegen“ bezeichnet.

auf als ein anderes, so ist dieses ein typischerer Vertreter für den Oberbegriff: Dabei können definierende (zwingende) Merkmale von charakteristischen (möglichen) Merkmalen unterschieden werden. Ein definierendes Merkmal für den Begriff „Vogel“ wäre demnach „hat Federn“, ein charakterisierendes „kann fliegen“. (SCHERMER 1998)

Wie im vorangegangenen Absatz schon deutlich wurde, ist ein wesentliches Charakteristikum semantischen Wissens das Vorhandensein von Begriffsrelationen. Diese werden heute zumeist in Form semantischer Netzwerkmodelle beschrieben. Begriffe werden dabei als Knoten verstanden, die durch in Form von Fäden (Kanten) versinnbildlichten Relationen oder Assoziationen verknüpft werden. Neuere Ansätze („distributed memory models“) gehen davon aus, dass keine festen Knoten für Begriffe existieren. Ein Begriff wird vielmehr durch ein charakteristisches Aktivationsmuster innerhalb eines Netzes von Knoten gebildet (DORN 1998).

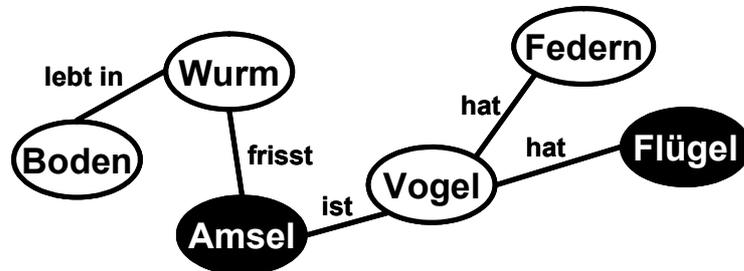
Im Gegensatz zu dem o.g. Mengen- und Merkmalvergleichsmodell müssen für den Abruf einer Information Begriffs- und Wissensrepräsentationen nicht erst ermittelt werden, sondern lassen sich als direkt im Netzwerkmodell enthaltenes Wissen suchen und finden. Semantische Netzwerke sind allerdings nicht zwingend konkurrierend zu den vorangestellten Modellen zu sehen. Auch für die Datenspeicherung (IT) haben semantische Netzwerke an Relevanz gewonnen. Derartige, synthetische Modelle – auch als externe Semantik bezeichnet – sollen im Folgenden allerdings nicht berücksichtigt werden.

Aktivationsausbreitungsmodell (SCHERMER 1998; BADDELEY 1997)

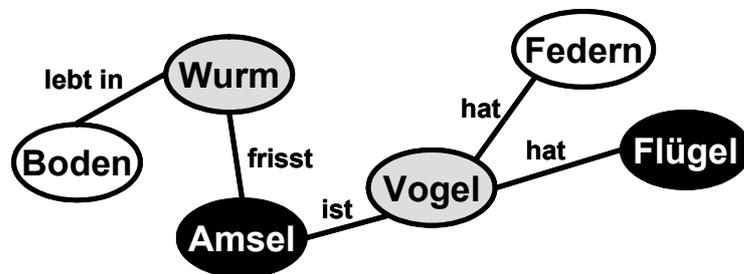
Frühere Modelle gingen von einer hierarchischer Organisation von Begriffen im semantischen Gedächtnis aus. Als alternatives Strukturprinzip schlagen COLLINS & LOFTUS (1975) das semantische Ähnlichkeitsprinzip vor. Demzufolge sind Begriffe um so ähnlicher, je mehr Relationen zwischen ihnen bestehen. Relationen können dabei sehr vielgestaltig sein und etwa in Form von Verben (Prädikate), Negationen, u.v.m. vorliegen. Das Aktivationsausbreitungsmodell setzt weniger einen Schwerpunkt auf die Architektur eines Netzwerkes, sondern vielmehr auf den Abruf von Wissen aus diesem.

Ein solcher Prozess zum Abruf von Wissen soll anhand des Beispiels einer Verifikationsaufgabe erläutert werden (vgl. auch Abbildung 3-6): Gilt es den Satz „Amseln haben Flügel“ zu verifizieren, so werden zunächst alle mit der Aussage verbundenen Knoten (hier also „Amsel“ und „Flügel“) sowie die dazugehörigen Relationen aktiviert. Durch die Aktivierung der Relationen werden außer den Startknoten noch weitere benachbarte Knoten und deren Relationen aktiviert. Nach einer gewissen Zeit ergibt sich möglicherweise über einige andere Knoten hinweg eine oder mehrere mittelbare Relation/-en zwischen den beiden Startknoten. Welcher Art diese Relationen sind, ist dabei zunächst irrelevant. Die Art der Relation wird erst in einem zweiten Schritt für die eigentliche Aufgabe, also der Überprüfung der Aussage relevant. Für das Beispiel könnte sich also folgende mittelbare Relation ergeben: „Amseln sind Vögel“, „Vögel haben Flügel“. Die Bewertung der Relationen

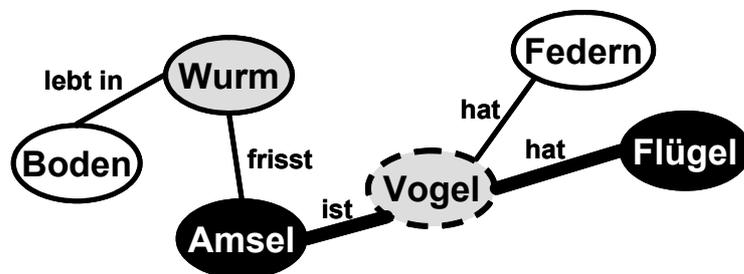
könnte folgendermaßen aussehen: „Da Amseln Vögel sind und Vögel Flügel haben, haben Amseln Flügel“.



Aktivierung der primären Knoten durch Aufgabenstellung



Aktivierung der sekundären Knoten durch Relationen



Pfadbildung zwischen relevanten Knoten (Bewertung)

Abbildung 3-6: Beispiel der Verifikationsaufgabe „Amseln haben Flügel“ gemäß des Aktivationsausbreitungsmodells.

Die Art der Aktivierungsausbreitung hängt von der Stärke der Aktivierung ab. Diese nimmt mit dem Zeitverlauf und zunehmender Distanz vom Startknoten ab¹. Relationen haben dabei keine einheitliche Stärke. Die Relation wird vielmehr dann stärker, wenn sie häufiger aktiviert wird. Dadurch lässt sich der sog. „semantic priming effect“ erklären. Bei

¹ auch als Dämpfung bezeichnet

diesem erleichtert die Aktivierung eines Wortes die Verarbeitung eines nachfolgenden begrifflich verwandten Wortes (hierzu auch DORN 1998).

Bei dem Abruf von Wissen aus dem semantischen Gedächtnis lässt sich ein sog. Paradoxon der Abruf-Interferenz identifizieren: Zwar zeigten Versuche, dass Abrufprozesse umso länger dauern, je mehr Information im betreffenden Netzbereich gespeichert ist. Unsere Alltagserfahrung zeigt aber, dass Experten ihr Fachwissen deutlich schneller als Laien abrufen können. Neuere Ansätze gehen davon aus, dass Abrufprozesse umso rascher ablaufen, je mehr Wissen in den relevanten Netzbereichen gespeichert ist. Erklären lässt sich dies damit, dass ein Aufsummieren von Aktivierungsstärken bei stärker vernetzten Strukturen schneller abläuft als bei weniger vernetzten. (KLIMESCH, 1995)

Das Aktivationsausbreitungsmodell ist sehr gut geeignet, um die Kreativität anregenden Mechanismen einiger Methoden wie etwa der Synektik, der Reizwortanalyse oder der Prinzipie zur Auflösung von Widersprüchen (TRIZ) zu erklären. Derartige Methoden führen durch das Anbieten scheinbar problemirrelevanter oder sehr abstrakter Begriffe zu einer weitläufigeren Aktivierung unseres semantischen Gedächtnisses. Der messbare Erfolg dieser Methoden wird so nachvollziehbar (siehe hierzu auch die Diskussion von „Kreativitätstechniken“ in Kapitel 4.4).

Propositionales Wissen (SCHERMER 1998)

Das Modell des propositionalen Wissens erweitert die Netzwerkmodelle um ein Speicherkonzept für komplexere Einheiten, wie z.B. die Speicherung eines Textes. Dieser Ansatz postuliert, dass unser Wissen in Form von abstrakten Bedeutungen gespeichert ist, bei denen irrelevante Einzelheiten unberücksichtigt bleiben. Wir können uns also an den Erzählstrang eines Romans erinnern, in den seltensten Fällen jedoch an einzelne Sätze. Aus den abstrakten, gespeicherten Beziehungen kann der Bedeutungsgehalt eines Textes rekonstruiert werden. Propositionen bestehen den Netzwerkmodellen entsprechend aus zwei Knoten (hier Argumente) und einer sie verbindenden Relation (auch Prädikat). Das Verständnis eines Romans kann man nicht als alleinige Leistung des semantischen Gedächtnisses sehen, sondern vielmehr als Interaktion zwischen semantischem und episodischem Gedächtnis. So unterscheiden Netzwerktheorien primäre Knoten (types), in denen allgemeine Konzepte repräsentiert sind („Vögel haben Flügel“) und sekundäre Knoten (token), die nicht verallgemeinerbar sind („der Vogel hatte gestutzte Flügelfedern“). Primäre Knoten werden dem semantischen Gedächtnis, sekundäre Knoten eher dem episodischen Gedächtnis zugeordnet.

Schemata und Skripts

Das propositionale Modell beinhaltet keinerlei strukturelle Aspekte. Dieses Defizit lösen Schemata: Unter einem Schema wird ein größerer thematisch zusammenhängender Wissensbereich verstanden, der als abgrenzbarer Teil eines Netzwerks aufgefasst wird. Hier sind typische Zusammenhänge eines Wirklichkeitsbereichs aufgrund gemachter Erfahrun-

gen repräsentiert. Das damit nicht zwingend logisch aufgebaute Schema ist durch seine variablen Merkmale¹ charakterisiert. Genau wie Begriffe existieren für Schemata Oberbegriffe, deren Merkmale auf die untergeordneten Konzepte übertragbar sind. Schemata sind hierarchisch strukturiert. Es existieren folglich innerhalb von Schemata Teilbereiche die eigenen Schemadefinitionen genügen (SCHERMER 1998; BADDELEY 1997).

Skripts weisen bei ähnlicher Struktur wie Schemata eine hohe Affinität zu zeitlichen Abläufen auf. Sie beziehen sich auf „in ihrem situativen Kontext und Ablauf relativ stereotypisierte Aktivitäten und Ereignisse“². Sie haben damit handlungsleitende Funktion, da sie die sinnvolle Aufeinanderfolge von Aktivitäten bestimmen. „Als erfahrungsbedingte Konstrukte sind Skripts flexible, änderungsfähige Einheiten, in denen neue Lernerfahrungen Berücksichtigung finden.“ (SCHERMER 1998)

3.3.2 Episodisches Gedächtnis

Eine scharf umrissene Darstellung des episodischen Gedächtnisses ist angesichts einer gewissen Unschärfe innerhalb der aktuellen Literatur nicht leicht zu verwirklichen. Der Begriff des episodischen Gedächtnisses wird teilweise synonym zum Begriff des autobiographischen Gedächtnisses (SCHERMER 1998), teilweise als Subsystem dieses (PIOLINO ET AL 2002) oder in Form eines Protokollgedächtnisses dem Arbeitsgedächtnis näher stehend als dem autobiographischen Gedächtnis (CONWAY 2002) verwendet. Im Folgenden soll eine scharfe Trennung zwischen episodischem und autobiographischem Gedächtnis unterbleiben.

Das episodische Gedächtnis speichert Ereignisse, die das Individuum erlebt hat. Damit ist es möglich, sich gedanklich in die eigene Vergangenheit zu begeben. Zwar fällt in manchen Fällen die Abtrennung von semantischem und episodischen Gedächtnis schwer (vgl. vorangegangenes Kapitel), das Krankheitsbild der Amnesie stärkt allerdings das Konzept zweier abgegrenzter Speicher: Ein unter Amnesie leidender Patient ist in der Lage, ohne Einschränkungen zu lesen und zu sprechen, tagtägliche Tätigkeiten auszuführen, sein autobiographischer Gedächtnisinhalt fehlt jedoch teilweise oder vollständig (BADDELEY 2002).

Die Arbeitsweise des episodischen Gedächtnisses kann mittels eines dual-process models erklärt werden. Die beiden dabei unabhängig voneinander ablaufenden Prozesse sind der recollection und familiarity process. Wollen wir uns bewusst an ein bestimmtes Ereignis erinnern, erfolgt dies indirekt (recollection process), indem wir die Einzelheit vom Allge-

¹ auch „slots“. Das Auto-Schema könnte also die slots Motortyp, Farbe, Bauart, ... enthalten.

² z.B. „Wäschewaschen“, „Restaurantbesuch“, „Tankstellenbesuch“,

meinwissen (Lebensabschnitte, allgemeine Ereignisse) her „rekonstruieren“. Es ist aber auch möglich, Einzelheiten unwillkürlich und direkt abzurufen (familiarity process). Dabei aktivieren Hinweisreize (Gerüche, Klänge, Situationen, ...) Bereiche mit gespeicherten Einzelheiten, die uns in Folge bewusst werden. (YONELINAS 2002; PIOLINO ET AL 2002)

Inhalte des episodischen Gedächtnisses gelangen durch einen Abstraktionsprozess, der im Wesentlichen auf elaborierenden Wiederholungen beruht in kontextfreier Form in das Semantische Gedächtnis (PIOLINO ET AL 2002). Interessant ist, dass Lernprozesse, die quasi das episodische Gedächtnis umgehen (z.B. das Lernen von Vokabeln) aufwändig sind und nur mit Übung (Wiederholungen) erfolgen können. Inhalte des episodischen Gedächtnisses hingegen (was man am Vortag mittags gegessen hat) scheinen sich praktisch ohne Mühe zu ergeben.

3.3.3 Priming

Durch Priming wird mittels eines Sinneseindruckes eng kontextbezogen und vorbewusst der Abruf ähnlicher Erinnerung erleichtert (JAFFARD 2002). Sichtbar wird dieser Effekt bei der Aufeinanderfolge zweier Verifikationsaufgaben mit gleichem Kontext. (1.: „Eine Amsel ist ein Vogel“, 2.: „Amseln haben Flügel“). Es zeigt sich, dass aufgrund des Priming-Effekts die zweite Verifikationsaufgabe signifikant schneller beantwortet werden kann. Ist die zweite Verifikationsaufgabe kontextfremd (2'.: „Autos haben einen Motor“), lässt sich keine beschleunigte Beantwortung beobachten. Die erste Aufgabe kann als „Prime“ bezeichnet werden, die zweite als „Target“. Im Folgenden sollen knapp einige Priming-Phänomene benannt werden (nach DORN 1998):

- Assoziatives Priming: Sind Prime und Target über eine Assoziation verbunden (vernetzt, Kontext), erhält man einen Priming-Effekt.
- Perzeptuelles Priming: Besteht eine perzeptuelle¹ Ähnlichkeit zwischen Target und Prime, ist trotz fehlender Assoziation ein Priming-Effekt zu beobachten.
- Mediiertes Priming: Hier handelt es sich um ein mittelbares Priming, z.B. vom Prime „Löwe“ über „Tiger“ zum Target „Streifen“. Neuere Befunde belegen diese Form des Primings, ältere fanden keine Anzeichen dafür.
- Sublimales Priming: Ein Priming-Effekt lässt sich auch dann beobachten, wenn die Versuchspersonen nicht wahrnehmen, dass vor dem Target ein Prime dargeboten wurde.

¹ syn.: „in der Vorstellung“

Unabhängig von ihrer Art verdeutlichen Priming-Effekte, dass Kognition immer in zeitlichem Kontext gesehen werden muss und unterstreichen damit die dynamischen Eigenschaften unseres Gedächtnisses.

3.3.4 Exkurs in die Neurobiologie

Die zahlreichen Gedächtnismodelle (sowohl auf Makro als auch auf Mikroebene) scheinen eine heuristisch bedingte Abgrenzung zu neurobiologischen Erkenntnissen aufzuweisen. So sind gerade semantische Netzwerkmodelle, die in der Psychologie Anwendung finden, strukturell deutlich andersartig als natürliche neuronale Netzwerke. Abgesehen von heute sicherlich noch unterschiedlichen Auflösungsgraden der Betrachtung in Biologie und Psychologie sind Gedächtnismodelle der Psychologie in letzter Instanz nur dann stimmig und belegbar, wenn sie in Übereinstimmung mit den harten Fakten neurobiologischer Erkenntnisse sind. Es soll deshalb an dieser Stelle versucht werden, einen sehr knappen Überblick über Erkenntnisse im Bereich der Neurobiologie, die belastbare funktionale Erklärungen bis auf die Nanoebene liefert, zu verschaffen¹:

Tiere besitzen im Gegensatz zu Pflanzen neben einem hormonellen ein neuronales Kontrollsystem. Die Notwendigkeit einer neuronalen Kontrolle ergibt sich allein durch die Mobilität von Tieren, die Reaktionszeiten im Bereich von Millisekunden erfordert. Bausteine von Nervensystemen sind von sog. Gliazellen umgebene Neuronen. Neuronen können elektrische Signale mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 m/s leiten. An den Membranen dieser Zellen liegt ein durch an Innen- und Außenseite befindliche An- und Kationen² erzeugtes elektrisches Potenzial (exakter: „Ruhepotenzial“) vor. Um Diffusionsprozesse, die zu einem Ionenaustausch und damit zu einem Ausgleich dieses Potenzials führen würden zu unterbinden, befinden sich in der Membran Ionenpumpen und steuerbare, selektive Poren. Ein elektrisches Signal wird bei einer überschwelliger Anregung des Neurons durch eine durch Ionentransport erzeugte schlagartige Depolarisation der Membran dargestellt. Diese Depolarisation hält ca. 1 ms an, die anschließende Repolarisation stellt das Ruhepotenzial der Membran wieder her. Eine Reizstärke wird in eine Frequenz von Aktionspotenzialen übersetzt.

Neuronen sind über Synapsen miteinander verschaltet. Es lassen sich elektrische Synapsen und chemische Synapsen unterscheiden. Elektrische Synapsen ermöglichen durch sog.

¹ Dem interessierten Leser sei für eine ausführlichere Darstellung ein Biologie-Lehrbuch (Zoologie) ans Herz gelegt (siehe z.B. Literaturverweis dieses Abschnitts).

² Dabei handelt es sich um (große) organische Anionen (in der Literatur vereinfacht A⁻) Natrium und Kaliumionen (Na⁺, K⁺).

gap-junctions¹ eine direkte intercelluläre Reizweiterleitung. Chemische Synapsen leiten Reize durch sog. Neurotransmitter weiter. Diese Neurotransmitter werden bei einem einlaufenden Signal in den synaptischen Spalt ausgeschüttet. Diese Stoffe erzeugen durch eine chemische Veränderung der Membraneigenschaften ein Aktionspotenzial bei dem nachgeschalteten Neuron. Neurotransmitter werden innerhalb von 1-2 ms nach ihrer Ausschüttung enzymatisch inaktiviert (vgl. Abbildung 3-7).

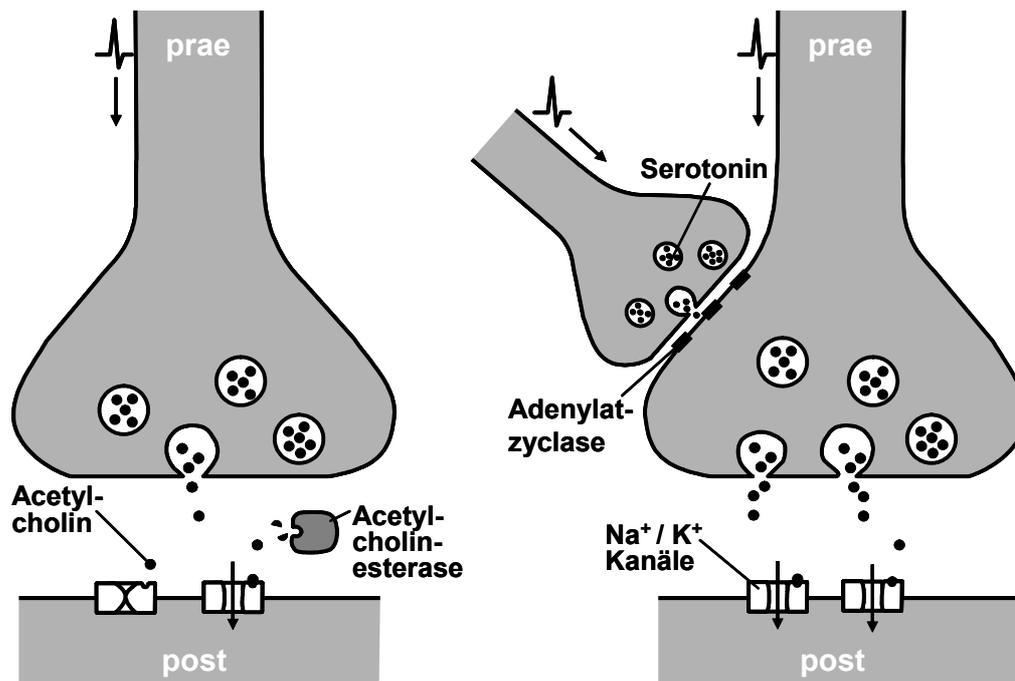


Abbildung 3-7: Stark vereinfachte Darstellung von Synapsen. Links: Einfache Synapse. Rechts: Präsynaptische Bahnung.

Im Gegensatz zu elektrischen Synapsen, die einen Reiz 1:1 weiterleiten, modulieren chemische Synapsen je nach Typ den weiterzuleitenden Reiz. In einer generellen Betrachtung lassen sich chemische Synapsen in verstärkende und hemmende unterteilen. Synapsenmodulation kann durch chemische Stoffe wie Medikamente oder Hormone geschehen. Schmerzmittel führen zu einer hemmenden Wirkung der Reizleitung. Der chemische Prozess der Weiterleitung eines Reizes durch Transmitter wird dabei je nach Stoff an unterschiedlichen Stellen unterbrochen. Hormone wie Adrenalin können zu Reizverstärkungen führen. Psychologische Untersuchungen belegen eine Sensibilisierung eines Phobikers durch ein Phobie erzeugendes Bild: Zeigt man dem Probanden kurze Zeit später ein ähnliches Bild, erfolgt die Reaktion darauf schneller als beim ersten, die Reizvorlage kann dazu auch deutlich schwächer sein (unscharfes Bild,...). Neben der chemischen Modulation

¹ Vereinfacht gesagt handelt es sich dabei um eine Verbindung durch reizleitende Membranen.

kann eine Veränderung der Signalstärke auch durch die Aufschaltung aktivierender Synapsen (präsynaptische Bahnung) erreicht werden. In diesem Fall wird durch einen speziellen Neurotransmitter (Serotonin) der verstärkenden Synapse die Membran der eigentlich reizleitenden Synapse dahingehend verändert, dass es zu einer verlängerten Dauer der Nervenimpulse und damit zu einer vermehrten Ausschüttung an Neurotransmitter (Acetylcholin) kommt (WEHNER & GEHRING 1992)

Etablierte Netzwerkmodelle in der Psychologie scheinen einerseits in ihrer Form von den Erkenntnissen der Neurobiologie noch recht weit entfernt zu sein. Andererseits lassen sich Beobachtungen der Psychologie zumindest auf den ersten Blick mit den physiologischen Gegebenheiten unseres Gehirns in Einklang bringen:

Gerade zwischen Priming-Effekten und den Charakteristika chemischer Synapsen und deren modulierender Wirkung lassen sich plausible Zusammenhänge identifizieren. Chemische Prozesse benötigen einen Zeitraum für ihren Ablauf. Selbst wenn die Konzentration an Neurotransmitter im Synapsenspalt nach erfolgreicher Reizweiterleitung unter den Schwellenwert der Reizübertragung gefallen ist, ist eine gewisse Menge an Neurotransmitter bei einer erneuten Aktivierung der Synapse zusätzlich vorhanden. Die Deaktivierung eines Netzbereichs entspricht also weniger einem schlagartig wirkenden Ein/Aus-Schalter, sondern vielmehr einem Abklingen. Da Priming-Effekte nur in extrem kurzen Zeiträumen beobachtbar sind, scheint ein Zusammenhang plausibel.

Die Annahme, *ein* Begriff sei durch *einen* abgrenzbaren Knoten repräsentiert, scheint aus neurobiologischen Gesichtspunkten widersinnig: Die einzig abgrenzbare Einheit in Nervensystemen ist ein einzelnes Neuron. Bereits die Betrachtung weniger Neuronen macht eine Grenzziehung durch die unüberschaubare Zahl qualitativ sich unterscheidender synaptischer Verbindungen ohne einen kombinatorischen Ansatz unmöglich. Die strukturelle Analogie zwischen einem Knoten und einem Neuron ist bei diesem Modelltyp folglich per Definition zwingend. Wäre also einem Begriff ein einzelnes Neuron zugeordnet, müsste dies im Umkehrschluss heißen, dass sämtliche Begriffe, die wir im Lebenslauf speichern, bereits als Neuron angelegt sein müssten (Es ist bewiesen, dass der Mensch mit einer maximalen Zahl von Neuronen geboren wird. Im weiteren Lebenslauf nimmt diese Zahl ab.). Angesichts der Zahl der Begriffe, die von Menschen weltweit benutzt werden, ist dies extrem unwahrscheinlich, da unnatürlich unwirtschaftlich. Die Annahme, ein Begriff werde entsprechend des „distributed memory models“ durch ein Aktivationsmuster gebildet, scheint vor dem physiologischen Hintergrund zwingend.

Erklärungen seitens der Psychologie für die Ausbildung von Aktivationsmustern sind nur schwer greifbar. Die Einführung verstärkender und hemmender neuronaler Verschaltungen und eine Konstruktion von Abhängigkeiten zueinander (falls in der Neurobiologie nicht ohnehin schon bekannt) könnten hier sicherlich zu einer positiven Weiterentwicklung von auf Aktivationsausbreitungsmodellen basierenden Netzwerkmodellen führen.

KRAUSE, Psychologe an der Universität Jena, nutzt die messbaren Signale der Nervenzellen unseres Gehirns um einerseits Aussagen über den kognitiven Aufwand beim Lösen von Problemen zu gewinnen, andererseits Topologien des Gehirns sowie ihre zeit- und problemabhängige Aktivierung zu erforschen. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass intelligente Menschen mit einem sehr viel geringeren kognitiven Aufwand vergleichbare Ergebnisse erzielen als durchschnittlich begabte Menschen (KRAUSE ET AL 2001). Stellt man sich das Gehirn als Analogon zu einem Computer vor (ein sicherlich populäres Bild), führt dies zunächst zu einem scheinbaren Widerspruch: Hier würde man die bessere Rechenleistung durch schnellere Prozessoren und umfangreichere Speicher erwarten, nicht durch eine Reduktion der Aktivität in diesen. Weiterführende Untersuchungen an Hochbegabten zeigten, dass sich die VPn mindestens zweier die Denkökonomie erhöhender Mechanismen bedienen – und zwar der Vereinfachung und der Doppelrepräsentation. Unter Vereinfachungen sind Klassen- und Strukturbildung, Reduktion und Selektion von Merkmalen usw. zu verstehen. Wie bereits weiter vorne erwähnt, wird dieser Prozess durch eine Reihe von Arbeitsmethoden unterstützt (vgl. im Folgenden auch Kapitel 5, 4.2 und 4.3). Inwiefern Doppelrepräsentationen beeinflussbar sind, ist offen. Untersuchungen haben gezeigt, dass Hochbegabte Information meist in zwei unterschiedlichen Repräsentationen kodieren. So hören und sehen musikalisch Hochbegabte die Musik gleichzeitig. Man geht davon aus, dass der Wechsel zwischen zwei unterschiedlichen Repräsentationen (Modalitätswechsel) sehr vorteilhaft für das Lösen von Problemen ist (siehe dazu auch Kapitel 3.4). Liegen demzufolge schon früh zwei Repräsentationen vor, ist der Wechsel zwischen ihnen deutlich einfacher (KRAUSE ET AL 2001). Der Modalitätswechsel ist ein in der Psychologie anerkanntes und als sehr wirkungsvoll erachtetes Mittel zur Steigerung kognitiver Effizienz und damit letztlich auch der Kreativität. Arbeitsmethoden werden diesem Faktum bislang kaum gerecht.

3.4 Problemlösen und Gedächtnis

Nach DÖRNER (1995) ist menschliches Problemlösen durch die gedankliche Transformation fiktiver Zustände mittels Handlungsoptionen¹ geprägt. Damit wird Handlung vorweggenommen und intern evaluiert. Essentieller Bestandteil planerischen Denkens sind dabei Informationen in jeglicher Form, die aus sämtlichen Bereichen des Gedächtnisses abgerufen werden. Da Probleme größerer Komplexität eine hohe Zahl an sequenziellen Handlungsoptionen und damit einen hohen planerischen Aufwand fordern, bilden sich individuell verknüpfte Handlungsoptionen (Makrooperationen), die im Gedächtnis gespeichert

¹ In den Worten Dörners Konstellationen und Operationen. Konstellationen und Operationen bilden ein fiktives Netzwerk, das als Problemraum bezeichnet wird. In der Konstruktionsmethodik würde man eher von einem Lösungsraum sprechen, der einem Problem zugeordnet werden kann.

werden und bei ähnlich wirkenden Problemen abgerufen werden. Derartige „Patentrezepte“ führen wie Experimente bewiesen haben einerseits zu einer Beschleunigung der Planung, andererseits zu teilweise ineffizienten Problemlösungen. Im Alltagsgebrauch spricht man im negativen Fall dann von der „Blindheit des Fachmanns“.

Bei komplexen Problemen empfiehlt DÖRNER (1995, S.297-320) die Änderung des (subjektiven) „Problemraums“. Dazu bieten sich vier Strategien an: „Abstrahieren und Rekonkretisieren“, „Analyse“, „Analogien suchen“, „Wechsel der Codierung“.

Hinter der Strategie „Abstrahieren und Rekonkretisieren“ verbirgt sich letztlich das Aufstellen einer abstrakten Zielformulierung. Durch einen abstrakten Oberbegriff kann man von einer weitläufigeren Aktivierung von Handlungsoptionen in vernetzten Gedächtnisbereichen ausgehen, als ohne eine solche.

Durch „Analyse“ wird ein System in seine Subsysteme zerlegt. Auf der Ebene der Subsysteme können isoliert Handlungsoptionen untersucht werden, was auf der Ebene des Gesamtsystems durch eine wenig überschaubare Komplexität erschwert würde.

Die Verwendung von Analogien führt zu einer probeweisen Umstrukturierung eines wenig vertrauten Problemraums in einen bekannteren. Dieser Vorgang ist untrennbar mit dem Vorgang der Abstraktion verbunden. Durch den Analogieschluss kann sehr „fremdartiges“ Material in einen Problemraum transferiert werden. Nach DÖRNER (1995, S.297-320) ist dem Analogieschluss eine „nicht überschätzbare Rolle“ im Bereich menschlicher Kreativität zuzuschreiben. Analogien finden ihre Entsprechung in Form von Metaphern in der Sprache.

Unter „Wechsel der Codierung“ wird im Wesentlichen die Überführung einer Darstellungsform in eine andere verstanden. Die beiden zentralen Darstellungsformen sind propositionale und analoge. Propositionale Darstellungen bedürfen der Bildung einer Vorstellung (Proposition), um verstanden zu werden. Eine propositionale Darstellung z.B. eines geometrischen Körpers könnte in Form von relativ zu einem Ursprung liegenden Koordinaten erfolgen. Eine solche Darstellung ist nicht sinnfällig, die Interpretation von Koordinaten hinsichtlich ihres Bedeutungsgehaltes ist mit gedanklichem Aufwand verbunden. Eine analoge Darstellung ist im Wesentlichen eine der Reizvorlage entsprechende oder ähnliche Darstellung: Wird ein geometrischer Körper nicht durch seine Koordinaten, sondern durch ein Plastilinmodell dargestellt, handelt es sich folglich um eine analoge Darstellung. Analoge haben gegenüber propositionalen Darstellungen den Vorteil, in ihrer Handhabung und in ihrem Speicherplatzbedarf deutlich ökonomischer zu sein. Darüber hinaus sind sie „plastischer“, d.h. ein Perspektivenwechsel ist deutlich einfacher. Propositionale haben im Vergleich zu analogen Darstellungen den Vorteil, Strukturtransformationen zu erleichtern. Analoge Darstellungen weisen dagegen bei komplexeren Gebilden eine gewisse Resistenz gegenüber Transformationen auf. Die propositionale Codierung beruht auf Wortmarken, die den Komponenten und ihren Relationen eines Sachverhalts einzeln zuge-

ordnet sind. Durch das Ändern einzelner Codierungen verändert sich sehr leicht das gesamte Bild. Das Überführen analoger in propositionale Darstellungen kann also den Betrachtungshorizont aufgrund in der analogen Darstellung unüblichen Transformationen erweitern.

DÖRNER (1995, S.297-320) definiert Gedächtnisinhalte sowohl als Rohmaterialien für den Problemlösungsprozess als auch als dessen Produkt. Problemlösen ist damit weitgehend die Manipulation von Gedächtnisinhalten. Der Ort, an dem dieser Prozess stattfindet, ist dabei das Arbeitsgedächtnis. Vornehmlich dessen Inhalte beeinflussen aber auch die Art und Weise, wie der Problemlösungsprozess abläuft. Man muss folglich von einer bidirektionalen Wechselwirkung von Gedächtnisinhalt und Problemlösungsprozess ausgehen. Inhalt des Arbeitsgedächtnisses kann aus dem Langzeitgedächtnis abgerufenes Wissen sein, aber auch nebensächliche Eindrücke, wie etwa ein klingelndes Telefon. Scheinbar nebensächliche Informationen können dabei hemmend, aber auch kreativitätsfördernd wirken (man denke nur an einige „spontane Einfälle“ in anregender Umgebung). Gerade bei schwierigen Problemlösungsprozessen scheint die Reflexion eigenen Handelns zielführend zu sein. Für Reflexionen des Problemlösungsprozesses benötigt man die Inhalte des Protokollgedächtnisses.

So vorteilhaft Dörner die Bildung von Analogien als Katalysator für kreative Problemlösungsprozesse bewertet, so schwierig ist es, diese zu bilden. Worin diese Schwierigkeiten liegen zeigt, ein bereits in den 80er-Jahren durchgeführter Versuch. In diesem Versuch wurde den Versuchspersonen zunächst eine für die Lösung eines nachfolgenden Problems hilfreiche Geschichte erzählt (ohne dass diese dies wussten). In dieser Geschichte teilt ein General seine Truppen in kleine Einheiten auf, die dann von allen Seiten kommend eine durch Minen abgesicherte Festung erfolgreich stürmen. Bei dem Problem, für das die Versuchspersonen eine Lösung suchen sollten, handelte es sich um die Entwicklung eines Gerätes zur Bestrahlung von Tumoren mit Gamma-Strahlen. Kritisch an der Bestrahlung ist dabei die Tatsache, dass die Strahlen gesundes und krankes Gewebe gleichermaßen schädigen, ein im Körperinneren liegender Tumor folglich nicht ohne Schädigung der darüber liegenden Gewebsschichten behandelt werden kann. Die Lösung für das Problem findet sich abstrahiert in der Geschichte über den General wieder: Ordnet man mehrere leistungsschwache Gamma-Strahler (entspricht aufgeteilten Truppen), deren Leistung allein nicht für eine Gewebeschädigung ausreicht rund um den Tumor an (entspricht Festung) und fokussiert deren Strahlen auf den Tumor (entspricht Angriff), erfolgt nur im Tumor ein gewebeschädigender Energieeintrag. Von einer Kontrollgruppe, deren Teilnehmern die Geschichte über den General nicht erzählt wurde, lösten 10 % das Problem. Von den Versuchspersonen, denen die Geschichte erzählt wurde, lösten 20 % das Problem. Wurden die Versuchspersonen explizit darauf hingewiesen, dass die Geschichte für die Lösung des Problems hilfreich sei, lösten 92 % der Probanden das Problem (MARKMAN, 1999).

MARKMAN (1999) schließt aus den Versuchsergebnissen, dass Gedächtnisinhalte also nicht über die Ähnlichkeit der Relationen zwischen Objekten abgerufen werden. Für die unterbliebene Verknüpfung der Geschichte mit der Problemlösung durch die Versuchspersonen kann auch noch eine andere Erklärung dienen: Das Aufdecken von Relationen erfordert die Abstraktion der Geschichte. Möglicherweise werden Geschichten ohne Motivation schlichtweg nicht abstrahiert, Relationen treten also solange wir nicht aktiv danach suchen, nicht in unser Bewusstsein.

Unabhängig von der Deutung zeigt der oben geschilderte Versuch sehr deutlich, dass potenziell hilfreiche Information ohne externe Unterstützung nur sehr schwer mit der Lösung von Problemen verknüpft werden kann. Es darf vermutet werden, dass in mit dem o.g. Versuch vergleichbaren realen Situationen Gedächtnisinhalte noch deutlich schlechter in den Problemlösungsprozess einfließen. Zum einen weil dann potenziell zusammenhängende Information allein schon zeitlich viel stärker voneinander getrennt sein können, zum anderen, weil entgegen der Versuchssituation keine außerordentliche Situation vorliegt, in der man durch „Bauernschläue“ bereits aus den Rahmenbedingungen einen Zusammenhang vermuten muss.

3.5 Schlussfolgerungen

Wie die vorangegangenen Kapitel erahnen lassen, handelt es sich bei unserem Gedächtnis um ein überaus komplexes und schwer zu durchschauendes Gebilde. Primär liegt dies daran, dass es sich nur als „Black-box“ betrachten lässt. Dem entsprechend sind die Erkenntnisse der Psychologie noch weit davon entfernt, als ausreichend für einen zusammenhängenden Überblick über das menschliche Gedächtnis bezeichnet zu werden. Integrative Paradigmen in Form von Informationsflussmodellen, die Schlüsse für die Konstruktionsmethodik unterstützen würden, existieren derzeit nicht. Dennoch können einige „Trends“ bezüglich der Arbeitsweise unseres Gedächtnisses in den zahlreichen Einzelbefunden identifiziert werden, die auch für die Konstruktionsforschung von Interesse sind.

Beliebtes Gedächtnismodell in der Literatur der Konstruktionsforschung ist das aus Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis bestehende ZweispeichermodeLL. So anschaulich dieses Modell sein mag, ist es doch relativ ungeeignet Kernpunkte für erfolgreiche Prozesse zur Problemlösung daran festzumachen. Das Modell des Arbeitsgedächtnisses ist hierfür weit besser geeignet. In ihm wird externe Information bezüglich des Problems und möglicher Lösungsanalogien (sofern vorhanden) und interne Information in Form von Wissen aus dem Langzeitgedächtnis verarbeitet. Die Verarbeitung dieser Informationen hängt in hohem Maße mit der Form ihrer Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis zusammen. Wir haben ja nicht das Problem an sich im Arbeitsgedächtnis, sondern ein über die bezüglich des

Problems vorliegenden Informationen individuell gebildetes Problemmodell (vgl. Abbildung 3-8). Es scheint sinnvoll, sich folgende Zusammenhänge bewusst zu machen:

Daten und Informationen zu einem Problem liegen meist in unüberschaubarer Menge vor. Es ist unmöglich, diese in ihrer ursprünglichen Form in ein Problemmodell zu integrieren. Das Problemmodell wird deshalb diese Informationen in einer strukturierten Form repräsentieren müssen. Strukturierungen basieren auf der Abstraktion von Merkmalen zu übergeordneten Einheiten. Das Strukturieren der Information basiert folglich auf Basis unseres bestehenden Wissens (Prozess der Abstraktion), wir bilden Analogien. Um ein Problemmodell zu erzeugen, werden letztlich also externe und interne Informationen miteinander verknüpft. Damit zeigt sich auch eine Grundproblematik von Problemmodellen: Die Modellbildung ist äußerst subjektiv. Da technische Problemstellungen aber meist mehrere Personen betreffen (sowohl Bearbeiter als auch den späteren Nutzer), haben sie prinzipiell einen objektiven Charakter. Es ist letztlich diese Kluft, die zur Erzeugung von Nicht-Lösungen und damit zu ineffizienten Entwicklungsprozessen führen dürfte. Den (objektiv) kleinsten gemeinsamen Nenner einer Problemrepräsentation zu finden, dürfte für die Bildung von Problemmodellen entscheidend sein, ebenso wie das Bewusstsein, dass es sich dabei im Wesen um eine Hypothese handelt. Da wir heute in einer von Physik und ihrer Hilfswissenschaften dominierten Welt leben, liegt die Beschreibungsgrundlage derartiger Modelle in vielen Fällen nahe.

Die Bildung von Problemmodellen steht in einem engen Zusammenhang mit internen Informationen, die wir zur Bearbeitung des Problems aus unserem Gedächtnis abrufen. Dem Aktivationsausbreitungsmodell entsprechend hat hier die Abstraktheit von Begrifflichkeiten einen großen Einfluss auf den Erfolg. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass dabei ein verallgemeinerbarer Idealpunkt der Abstraktion existieren kann. Umgekehrt bedeutet das, dass man wohl gezwungen sein wird, den Abstraktionsgrad für den möglichst „vollständigen“ Abruf interner Information zu verändern (Abstrahieren und Konkretisieren). Den Forschungsergebnissen MARKMANS (1999, vgl. Kapitel 3.4) zufolge kommt erschwerend hinzu, dass Informationen über Objekte (-Begriffe) abgerufen werden, nicht über Relationen. Da aber für technische Problemstellungen Relationen sehr entscheidend sind, wird hier also ein „Springen“ zwischen einer Objekt- und einer Relationssicht notwendig sein - ein Prozess, der durchaus aufwändig sein kann. Relationen können im Sinne unseres Gedächtnisses zu Objekten werden, wenn wir sie abstrahieren und damit benennen. Das Identifizieren von Prinzipien scheint hier ein probates Mittel zu sein.

Der Kenntnisstand über Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen in Problemlösungsprozessen ist noch nicht so weit gediehen, dass man klare Empfehlungen aussprechen könnte. Indes ist zu bezweifeln, dass angesichts der unvermeidlich wirkenden Subjektivität bei diesen Prozessen dies jemals erschöpfend möglich sein wird. Für den Entwickler bedeutet das heute, dass die Reflexion eigenen Vorgehens, vor allem aber die selbstkritische Betrachtung und damit stete Anpassung der eigenen Problemmodelle entscheidend für den

Erfolg ist. Hierfür Bewusstsein zu schaffen und gezielt methodisch zu unterstützen, muss Aufgabe der Konstruktionsforschung sein.

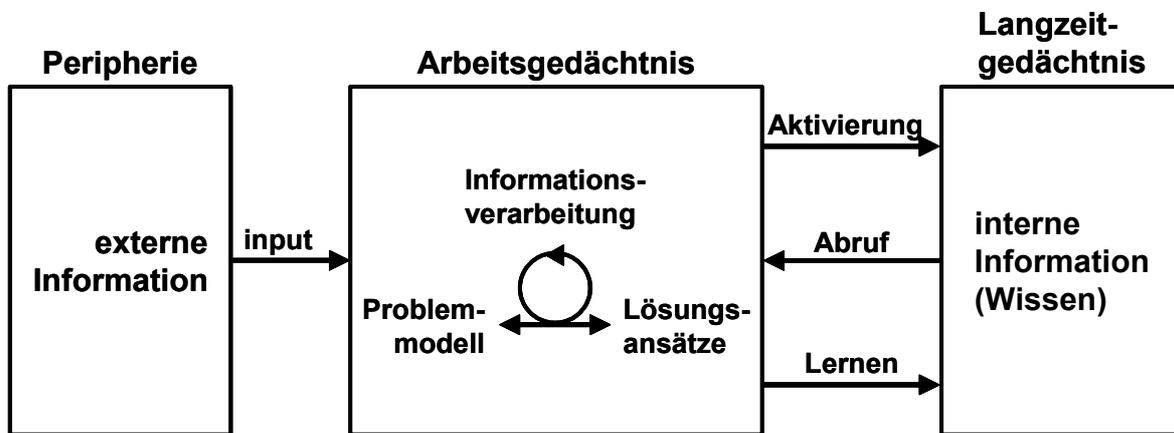


Abbildung 3-8: Informationsumsatz im Arbeitsgedächtnis.

Abschließend sei angemerkt, dass es auch heute noch für die Konstruktionsforschung sehr profitabel sein kann, Ergebnisse aus der Kognitionspsychologie zu verwerten. Zwar bestehen hier die üblichen interdisziplinären Kommunikationsprobleme, die es aber sicherlich wert sind, überbrückt zu werden. Gerade die Rolle von Problemmodellen und Modalitätswechseln in Problemlösungsprozessen wird in der Psychologie auf Untersuchungen basierend weit höher eingeschätzt, als dies heute in der Konstruktionsforschung der Fall ist. Die Verwertung dieser Erkenntnisse für die Entwicklung von Arbeitsmethoden stehen somit weitgehend noch aus.

4 Arbeitsmethoden zur Lösung technischer Probleme

In Kapitel 4 sollen einige vor dem Hintergrund der kognitionspsychologischen Betrachtungen aus Kapitel 3 ausgesuchte Arbeitsmethoden kritisch, wenn nicht sogar provokativ diskutiert werden. Die Konstruktionsforschung verfolgt die Intention, jedem Anwender zu guten Ergebnissen und mehr Effizienz bei der Lösung technischer Probleme zu verhelfen. Sowohl eigene Erfahrungen als auch Untersuchungen in industriellem Umfeld können den Verdacht nicht vertreiben, dass man von diesem Ziel noch ein Stück weit entfernt zu sein scheint. Ziel dieses Kapitels ist es, Potenzial für die Neuentwicklung und Anpassungen von Methoden herauszuarbeiten, die zum Teil in den folgenden Kapiteln noch weiter vertieft werden sollen.

4.1 Problemlösen als dialektischer Prozess

Die Konstruktionsmethodik im deutschsprachigen Raum entwickelt sich seit ihrer Entstehung weiter: Methodische Ansätze entstanden an deutschen Universitäten zunächst an konstruktionstechnischen Lehrstühlen, die sich überwiegend mit Maschinenelementen und Feinwerktechnik beschäftigten. Die deutliche Technologielastigkeit in diesen frühen Phasen ist dementsprechend eine fast notwendige Konsequenz. In den siebziger Jahren wurde die Konstruktionsmethodik maßgeblich von dem aus Amerika stammenden Systems Engineering beeinflusst, das die Betrachtungsgegenstände der Konstruktionsmethodik auf eine abstraktere und damit umfassendere Ebene stellte (DAENZER 2002). In den achtziger Jahren wendete man sich schließlich dem Menschen als Individuum in der Produktentwicklung zu – der Zweig der empirischen Konstruktionsforschung bildete sich. Die Integration psychologischer Gesichtspunkte in die bis dato überwiegend präskriptive Konstruktionsmethodik führte zu einem relativ deutlichen Perspektivenwechsel innerhalb der Forschungsgemeinschaft (z.B. RUTZ 1985). Heutige Ansätze weisen teilweise einen noch radikaleren Ansatz in Bezug auf die Menschorientierung innerhalb der Konstruktionsforschung auf: Gefordert wird eine flexible Gestaltung der Methodik passend zu individuellen Vorgehensweisen des Entwicklers. Wie von WULF (2002, S.146) treffend formuliert wird, kann Konstruktionsmethodik nur dann nachhaltig erfolgreich sein, wenn „... der Entwickler in seinem instinktiven Verhalten nicht gegen den Strich gebürstet wird...“.

Trotz der jüngeren Entwicklungen innerhalb der Konstruktionsforschung kann der Eindruck entstehen, dass die Analyse einer Problemstellung und die entsprechende Lösungssuche zwei große unabhängige Phasen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses sind.

Dies dürfte an der deutlichen Trennung dieser beiden Phasen in einigen stringenten Modellen des Produktentwicklungsprozesses liegen, die auch eine thematisch getrennte Darstellung von eindeutig entweder der Analyse oder der Synthese zugeordneten Methoden bedingt. Tatsächlich sind Prozesse der Analyse und Synthese auf kognitiver Ebene sehr stark miteinander verzahnt. Dies darf nicht weiter verwundern, finden sie doch nicht nur am gleichen Ort statt (in unserem Arbeitsgedächtnis), sondern auch sehr zeitnah: Das im Arbeitsgedächtnis auf Analyse basierend generierte Problemmodell („generieren“ – also schon hier Synthese!) wird mit potenziellen auf externen Informationen und Wissen basierenden Lösungen verglichen¹ (vgl. auch Kapitel 3.5). Dabei muss zwangsläufig von einer gegenseitigen Beeinflussung ausgegangen werden. Lösungsansätze beeinflussen unser Problemmodell, und sei es nur in der Form, dass wir uns durch einen Lösungsansatz plötzlich mit einem bisher nicht berücksichtigten Punkt konfrontiert sehen. Reflektiert man eigenes Vorgehen vor allem bei Neuentwicklungen, so wird man sich dabei ertappen, dass man sich in offiziellen Analysephasen notwendigerweise bereits mit Lösungsansätzen befasst. „Synthese zum Zwecke der Analyse“ hört sich aber auch heute noch für viele Methodiker paradox an. Zur Illustration ein Beispiel:

In einem Entwicklungsprojekt am Lehrstuhl für Produktentwicklung stellte sich die Aufgabe, alternative Konzepte für das rastbare Gelenk einer Designerlampe zu entwickeln. Die Firma, die mit dieser Aufgabenstellung an den Lehrstuhl herangetreten war, hatte das Designkonzept bereits in ein technisches umgesetzt, beim Bau des Prototypen zeigte sich allerdings, dass der Rastmechanismus des Gelenks stark unterdimensioniert war und nach wenigen Lastspielen versagte. Die geometrischen Randbedingungen waren vom Designer vorgegeben (ästhetische Gesichtspunkte) und schienen eine stärkere Dimensionierung zunächst nicht zuzulassen. Da ein enger Terminplan einzuhalten war – Bestellung der Spritzgusswerkzeuge in nur vierzehn Tagen – hatte man nun ein ernsthaftes Problem. In einem ersten Gespräch zwischen Mitarbeitern des Lehrstuhls und dem Entwicklungsleiter der auftraggebenden Firma galt es nun, die Freiheitsgrade für alternative Konzepte abzustecken, bevor die eigentliche Lösungsfindung gestartet werden konnte. Dazu wurden neben vielen weiteren folgende Fragen gestellt: Darf der Werkstoff geändert werden? Darf das Gelenk breiter werden? Können Gelenkspalte auch in der Mitte des Gelenks liegen? Ist dem Kunden zuzumuten, das Gelenk gelegentlich nachzuspannen? Das alles sind Fragen, deren Antworten sich für gewöhnlich in einer Anforderungsliste niederschlagen. Dennoch: Warum sollte man ohne das Vorliegen einer Checkliste nach Werkstoffen fragen, wenn man nicht daran denkt, diese zu verändern? Warum sollte man nach maximalen Abmessungen fragen, wenn man nicht daran denkt, einen unterdimensionierten Mechanismus

¹ In Handlungsmodellen findet sich immer auch ein Bewertungsschritt. klassifiziert man Handlung zu Analyse und Synthese, kann man diese Bewertungsschritte der Analyse zuordnen. Sie werden deshalb hier nicht gesondert aufgeführt.

stärker zu dimensionieren? Warum sollte man nach der Lage von Teilungen eines Gelenks fragen, wenn man nicht daran denkt, die Kinematik zu ändern – und zwar so, dass der sichtbare Gelenkspalt eben in der Mitte liegt? Warum sollte man danach fragen, ob der Kunde zu „Wartungsarbeiten“ bereit sei, wenn man nicht bereits daran denkt, Verschleiß in Kauf zu nehmen? Auch wenn bei diesem Gespräch kein Lösungsansatz explizit ausgesprochen wurde und das Gesprächsprotokoll dementsprechend eindeutig den Charakter einer Anforderungsliste aufwies, fand hier zum großen Teil unbewusst eine relativ intensive Lösungssuche statt! Synthese zum Zweck der Analyse!

Der Prozess des Problemlösens ist aus kognitiver Sicht nicht in größere zusammenhängende Abschnitte einteilbar, in denen man entweder nur Analyse oder nur Synthese betreibt. Tatsächlich findet bei Denkprozessen ein innerer Dialog statt, der auf einen sehr schnell Wechsel aus Analyse und Synthese aufweist. Interpretiert man Analyse und Synthese als gegensätzliche Begriffe, handelt es sich beim Problemlösen also um einen dialektischen Prozess. Dialektik ist hier nicht als philosophische Methode zum Ziel des Erkenntniszuwachses zu verstehen, sondern charakterisiert den Prozess des Problemlösens als „Kombination von Gegensätzlichem“, in diesem Fall von Analyse und Synthese.

Akzeptiert man die Untrennbarkeit von Analyse und Synthese, wird eine differenzierte Betrachtung der Begriffe Kreativität und Intelligenz in technischem Kontext notwendig: In der Konstruktionsmethodik (z.B. PAHL & BEITZ 2003) wird der Kreativität ein rein synthetisierender Charakter zugewiesen, während Intelligenz vor allem zur Analyse befähigt. Sprechen wir von technischer Kreativität (siehe Kapitel 2.2), ist diese einfache Definition sicherlich nicht zielführend. Da die technische Kreativität nicht nur Neuigkeit, sondern auch Angemessenheit fordert, ist eine Befähigung zur Analyse zwingend notwendig - wie sonst könnte man Angemessenheit feststellen? Vor dem Hintergrund der gegenseitigen Abhängigkeit von Analyse und Synthese gilt dies nur umso mehr. Ein gewisses Maß an Intelligenz ist also notwendige Voraussetzung für technische Kreativität. Andererseits kann man beobachten, dass (zumindest scheinbar) intelligente Menschen nicht zwingend kreativ sind. Spekuliert man woran dies liegen könnte, scheinen personenspezifische und motivationale Gründe im Vordergrund zu stehen. Zieht man Eigenheiten unseres Gedächtnisses in Betracht (Kapitel 3), scheidet mangelndes Abstraktionsvermögen (vgl. Aktivationsausbreitungsmodell) als Erklärung eher aus, da Analyse ohne Abstraktion nicht denkbar ist. Der Abruf von Gedächtnisinhalten auf Basis von Objekten und nicht Relationen (siehe Untersuchungen von MARKMAN (1999) in Kapitel 3.4) als Kreativitätshindernis scheint vor dem Hintergrund, dass Analyse im Wesentlichen das Aufdecken von Relationen bedeutet, ebenfalls eher unwahrscheinlich zu sein.

Obwohl das Kapitel 4 mit der „kreativen Lösungssuche“ überschrieben ist, ist es also aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung von Analyse und Synthese sicherlich zielführend zunächst etablierte Methoden zu betrachten, die den Entwickler bei der Bildung eines Problemmodells unterstützen sollen. An diesen Abschnitt schließt sich dann eine Betrachtung

tung von weniger verbreiteten Methoden an, die Problemmodellierung und das Bilden von Lösungsansätzen sehr stark vermischen und deshalb auch vor dem Hintergrund bestehender Sichtweisen in der Konstruktionsmethodik im Folgenden als „dialektische Methoden“ bezeichnet werden sollen. Der Begriff der „dialektischen Methoden“ soll dabei nicht implizieren es handele sich um Methoden für die Lösung dialektischer Probleme¹. Er stellt vielmehr eine Analogie zu der Interpretation des Lösens von Problemen als dialektischer Prozess dar.

Befragungen in der Industrie innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie initiierten Rahmenkonzepts „Produktion 2000“ weisen den Kreativitätstechniken angesichts ihrer Verbreitung als Methoden zur Synthese eine wichtige Rolle zu (vgl. Abbildung 4-1). Ob sie dieser Rolle vor dem kognitionspsychologischen Hintergrund gerecht werden können, soll in einem eigenen Abschnitt erörtert werden.

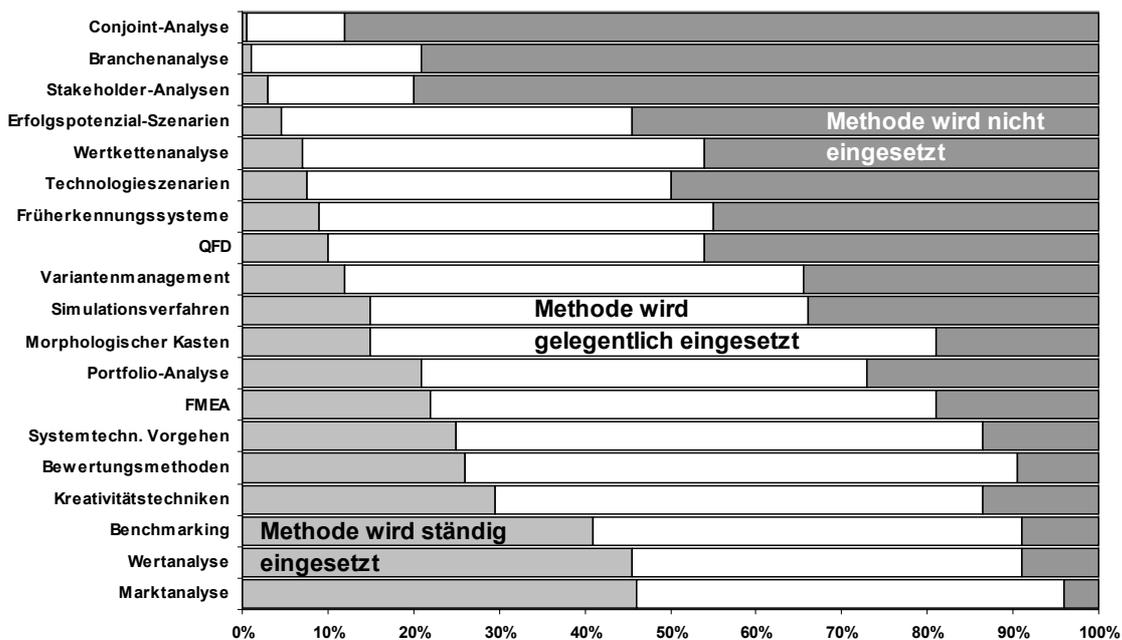


Abbildung 4-1: Umfrageergebnisse über in der Industrie eingesetzte Methoden (nach Grabowski 1997, S. 40).

¹ Dialektische Probleme sind nach DÖRNER (1995) dadurch gekennzeichnet, dass der anzustrebende Zielzustand des Problems unbekannt ist. Bei synthetischen Problemen ist der Zielzustand bekannt, der Weg dorthin allerdings nicht. Für die Lösung analytischer Probleme ist sowohl der Zielzustand, als auch Handlungen um diesen zu erreichen. Zur Lösung müssen diese Handlungen lediglich „...wie Teile eines Puzzlespiels...“ zusammengefügt werden.

Problemlösen als Informationsverarbeitungsprozess kann nicht allein auf dem Verwerten internen Wissens beruhen. Starke Innovationen sind vielmehr gerade durch die Integration von externen Informationen zu erwarten. Zu diesem Zwecke wurden methodische Ansätze auch außerhalb des Wissensmanagements speziell für den Prozess der Lösungssuche entwickelt. Neben vergleichsweise etablierten Methoden soll das populäre Thema der Bionik genauer betrachtet werden, das schon aufgrund der fachlichen Trennung zwischen Technik und Biologie ein hohes Potenzial bzgl. eines nutzbringenden Informationstransfers bieten könnte.

4.2 Methoden zur Problemmodellierung

Abstrakt betrachtet lassen sich technische Systeme als Netzwerke von durch Relationen (auch Wirkungen und Wechselwirkungen) miteinander verknüpften Objekten bezeichnen (DAENZER 2002). Die Bauteile einer Maschine (Objekte) stehen in Beziehung zueinander (Relationen), indem sie Stoffe, Energie oder Information gegenseitig austauschen. Die Maschine selbst (Objekt) steht möglicherweise in Beziehung zu anderen Maschinen oder auch dem Menschen. Gerade in letzterem Fall werden Wechselwirkungen zunächst etwas diffuser, gibt es hier doch Faktoren wie „zu teuer“, „zu laut“, „schöne Farbe“ und etliche mehr, die in der Regel entscheidend für den Erfolg eines Produktes sind. Technische Objekte weisen immer unabhängig von ihrer Bewertung Relationen auf. Würden sie keinerlei Relationen aufweisen, wären sie schlichtweg nicht existent. Ein technisches Problem stellt sich unter der obigen Systembetrachtung als fehlende (fehlende bedeutet nicht keine) oder unerwünschte Wechselwirkung und/oder als unerwünschtes oder fehlendes Objekt dar.

Wie in Kapitel 3.5 dargestellt, entwickeln wir ganz zwangsläufig ein Problemmodell, sobald uns eine Problemstellung bewusst wird. Idealerweise ist dies so gestaltet, dass es echte Lösungen nicht von vornherein ausschließt. Von der Konstruktionsforschung wurden letztlich zu diesem Zweck schon früh sogenannte Funktionsstrukturen propagiert. Unter einer Funktion wird das im Idealfall objektneutral formulierte Ziel eines Objekts (natürlich in Zusammenhang mit seinen Relationen, unabhängig von der Granularität der Betrachtung) verstanden. Ein Ziel ist hierbei entgegen PAHL & BEITZ (1993) nicht zwangsläufig ein positiv belegter Begriff. Vielmehr liegt die letztendliche Bewertung in der Ausprägung der zugehörigen Relationen begründet (siehe „schädliche Funktionen“ nach TERNINKO 1998). Stellt man das Zusammenspiel von Funktionen dar, handelt es sich um eine Funktionsstruktur (synonym –modell). Nach LINDEMANN & PULM (2001) kann man existierende Typen in hierarchische und umsatzorientierte Strukturen sowie Netzwerke einteilen (vgl. Abbildung 4-2).

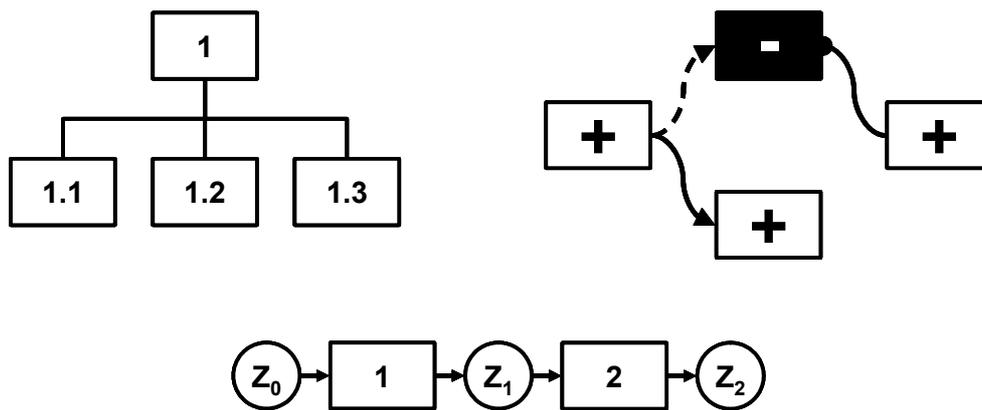


Abbildung 4-2: Typen von Funktionsmodellen. Links: Hierarchisches Modell. Rechts: Netzwerk (TRIZ). Mitte: Umsatzorientierte Struktur.

Hierarchische Strukturen untergliedern die Gesamtfunktion eines Systems in immer weiter untergeordnete Teilfunktionen. So lässt sich am Beispiel eines KFZs die Gesamtfunktion „Personen transportieren“ in die Teilfunktionen „Antriebsenergie bereitstellen“, „Benutzerschnittstelle bereitstellen“ usw. unterteilen, die ihrerseits wieder Teilfunktionen aufweisen. Zergliedert man ein System auf diese Weise, ergibt sich also ein mehr oder weniger fein verästelter Baum hierarchisch angeordneter Funktionen. Prinzipiell können derartige Strukturen „top-down“ von der Gesamtfunktion ausgehend oder „bottom-up“ von einer in der Hierarchie unten stehende Teilfunktion aus gebildet werden. Hierarchische Funktionsstrukturen können sicherlich die Abstraktion eines Systems unterstützen, eine Darstellung der Quervernetzungen, die gerade für technische Problemstellungen ausschlaggebend sind, ist hier nicht möglich. Zusätzlich verliert das hierarchische Modell im Bereich der Teilfunktionen in der Regel zunehmend an der für die Lösungssuche geforderten Lösungsneutralität, werden doch zunehmend die Funktionen von Baugruppen (-teilen) abgebildet. Als sehr einfache Ausprägung einer Funktionsstruktur ist diese Methode aufgrund der o.g. Defizite sicherlich als Problemmodell alleinstehend bei weitem nicht ausreichend. Ob der Aufwand bei der Aufstellung einer solchen Struktur überhaupt dem Nutzen gerecht wird, wird von Fall zu Fall individuell zu entscheiden sein.

Umsatzorientierte Funktionsstrukturen sind traditionell in der aus Deutschland stammenden Konstruktionsmethodik die Modellierungsart schlechthin. Auch wenn sie um zahlreiche weitere Spielarten erweitert wurden, erwecken umsatzorientierte Funktionsmodellierungen den Eindruck, hier immer noch vorherrschend zu sein. Und das, obwohl sie trotz jahrelangem intensiven Propagierens in der Industrie kaum eine nennenswerte Verbreitung gefunden haben (LINDEMANN & PULM 2001). In der von EHRENSPIEL (1995) vorgeschlagenen Ausprägung kann prinzipiell ein Stoff, Energie und ein Signal umgesetzt werden. Eine Elementarfunktion verändert einen Zustand zunächst unabhängig von der Umsatzart. Insgesamt definiert EHRENSPIEL (1995) fünf solcher auch negierbaren Elementarfunktio-

nen¹. Die dadurch begrifflich stark eingeschränkte Funktionsmodellierung wird durch den von LINDEMANN (2001) vorgeschlagenen Ansatz deutlich aufgeweitet², bei dem auf die vordefinierten Elementarfunktionen zugunsten allgemeinerer, durch Substantiv und Verb gebildeter Funktionen verzichtet wird. Quervernetzungen zwischen einzelnen Umsätzen innerhalb eines Systems können durch drei spezielle Zustände erzielt werden. Umsatzorientierte Funktionsstrukturen beschreiben sehr gut die Arbeitsweise technischer Systeme auch in Abhängigkeit der Zeit. Die abstrakte Betrachtung eines Systems ist damit zwar nicht unmöglich, wird aber durch die Art und Weise dieser Methode eher weniger unterstützt. Ein gedankliches Lösen von einem möglicherweise bestehenden System ist mit dem Aufstellen einer derartigen Funktionsstruktur nicht immer gut möglich: Um das System auf dieser Basis weiter zu entwickeln, müssen letztlich Variationen durchgeführt werden, um die Funktionsstruktur zu verändern. Ein solches Vorgehen ist allerdings nicht zwangsläufig. Diese Form der umsatzorientierten Funktionsmodellierung dürfte sehr gut als Kommunikationsmedium dienen, sobald man innerhalb eines Teams die Funktionsweise einer Maschine zu erklären versucht. Auch die Wertigkeit dieser Methode innerhalb der Ausbildung soll nicht geschmälert werden, ist doch zu erwarten, dass dadurch das Erlernen des Denkens in Funktionen unterstützt wird. Als operative Methode³ zur Problemmodellierung mit dem Ziel der Vorbereitung einer möglichst kreativen Lösungssuche, stellt die umsatzorientierte Funktionsmodellierung sicherlich bei weitem nicht das „non plus ultra“ dar.

Ein Typ der Funktionsmodellierung, der auf einem Netzwerk basiert, ist die im immer stärker Beachtung findenden Methodenkomplex der Methodik TRIZ entstandene Form der Problemmodellierung (TERNINKO 1998). Die hierbei durch ein Substantiv und ein Verb ausgedrückten Funktionen werden in nützliche und schädliche unterteilt. Diese zwei Ausprägungen von Funktionen werden durch drei Typen gerichteter, logischer Relationstypen miteinander verknüpft. Es lassen sich so elementare Konstellationen von Funktionen bilden, die einerseits notwendige Abhängigkeiten aber auch schädliche (Neben-) Wirkungen sowie Zielkonflikte (Widersprüche) abbilden. Diese elementaren Konstellationen ermöglichen in späteren Schritten die algorithmisierte (und damit automatisierbare) Ableitung von Zielformulierungen für die Lösungssuche. Der Übergang von Problemmodellierung zur Erarbeitung von Lösungsansätzen ist gerade durch die Nutzung von Rechnerwerkzeugen

¹ Leiten, ändern, wandeln, vereinigen, speichern

² Diese Modifikation wurde mittlerweile auch von EHRENSPIEL (2003) übernommen.

³ Basierend auf einer Klassifizierung von Arbeitsmethoden in operative und didaktische: Unter didaktischen Methoden sind dabei solche zu verstehen, die dem Anwender nutzen, wenn man sie einmal erlernt hat. Vorteile ergeben sich dadurch, dass sich durch das Erlernen Heuristiken ausbilden, die später vom Anwender oft unbewusst eingesetzt werden. Typisch hierfür sind z.B. Variationstechniken. Operative Methoden sind solche, die weniger einen Lerneffekt mit sich bringen, als vielmehr bei Bedarf immer wieder angewendet werden können, gewissermaßen also handlungsorientiert sind. Dazu zählen z.B. Kreativitätstechniken oder Darstellungstechniken.

vergleichsweise zwangsläufig¹. Zunächst aber wird die Funktionsstruktur mit der Unterstützung einer algorithmisierten Fragetechnik top-down erstellt. Diese Form der Funktionsstruktur unterstützt den Anwender bei der Abstraktion des Problems und der Identifikation von „hot spots“ einer Problemstellung durch die Integration schädlicher Funktionen (Wirkungen). Darüber hinaus fördert diese Form der Problemmodellierung die Lösung von einer objektorientierten Sicht hin zu einer auf Relationen basierender. Man kann davon ausgehen, dass dadurch dem in Kapitel 3.4 identifizierten Manko entgegengesteuert wird, das darin besteht, dass die für das Problemlösen wichtigen Relationen in der Regel eher unberücksichtigt bleiben. Wird nach MARKMAN (1999) der Blick gezielt auf Relationen gerichtet, steigen die Chancen zur erfolgreichen Problemlösung (ausführlichere Diskussion in Kapitel 3.4). Die dazugehörige Fragetechnik unterstützt eine sehr starke Problemfokussierung auf abstrakter Ebene, ihr Wert als operative Methode dürfte deshalb den der umsatzorientierten Funktionsstrukturen hinsichtlich einer effizienten Lösungssuche übertreffen. Trotz dieser bestechenden Vorteile unterliegt auch diese stark formalisierte Form der Problemmodellierung einigen Einschränkungen. Kritisch wie bei allen auf Netzwerken basierenden Darstellungsarten werden komplexe Systeme zumindest auf dem Papier schnell unübersichtlich (LINDEMANN & PULM 2001). Der Einsatz von Rechnerwerkzeugen, mit denen sich Funktionen und ihre Relationen zusammenfassen, ausblenden und umsortieren lassen, wird dieses Problem zwar sicherlich abschwächen, aber nicht wirklich lösen können.

Ein Defizit der Funktionsstruktur nach TRIZ, das sie mit allen übrigen teilt, ist die Reduktion der Betrachtung rein qualitativer Zusammenhänge. Quantitative Zusammenhänge, die ein System oftmals sehr treffend beschreiben, fehlen hier vollständig. Wie gerade quantitative Zusammenhänge auch den Weg für eine kreative Lösungssuche ebnen können, soll im Kapitel 5 diskutiert werden.

4.3 Dialektische Methoden

Eine der Methoden, die Problemmodellierung und das Bilden von Lösungsansätzen in sehr starkem Maße miteinander verbindet, hat in der Vergangenheit unter der Bezeichnung WEPOL in Russland und in den Achtzigern auch in der DDR einige Verbreitung gefunden (RINDFLEISCH 1994). WEPOL – auch Stoff Feld Analyse genannt und von ALTSCHULLER (1986) als „minimales technisches System“ bezeichnet - ist eine derzeit eher unpopuläre Methode der Methodik TRIZ, die in der einschlägigen Literatur zwar häufig auftaucht, allem Anschein nach aber nur selten angewendet wird. Dies mag an der unnötigerweise komplex dargestellten Systematik in der Originalliteratur (ALTSCHULLER 1986) liegen.

¹ Z.B. die Software „Tech Optimizer“ der Fa. Invention Machine.

Letztlich wird mittels WEPOL ein technisches System als Netzwerk dargestellt, dessen Teilsysteme durch physikalische Wechselwirkungen verknüpft sind. Dabei stehen in der elementarsten Form zwei Stoffe über ein Feld in Wechselwirkung. Wechselwirkungen sind gerichtet und ihrer Qualität entsprechend dargestellt (erwünschte oder unzulängliche/unerwünschte Wechselwirkung). Dieses kleinste Element wird als Dreieck dargestellt (vgl. Abbildung 4-3, linke Bildhälfte). Unter einem Feld wird dabei eine physikalische Wechselwirkung verstanden, der streng physikalische Feldbegriff ist damit jedoch nicht gemeint. Ein Feld nach WEPOL kann z.B. eine Kraft sein, aber auch eine Strömung, eine Schallwelle und ähnliches. Der Begriff Stoff ist weniger als Werkstoff zu verstehen, sondern schlicht als ein in Wechselwirkung stehendes Element. Es kann sich dabei um ein Bauteil oder eine Baugruppe handeln, ist also ähnlich unspezifisch wie der Begriff Feld.

Analysiert man nun ein System auf der Ebene seiner Stoff-Feld-Wechselwirkungen, können sich technische Probleme als fehlende Stoffe oder Felder, beziehungsweise als unerwünschte oder unzulängliche Stoffe und Felder darstellen. Dementsprechend werden aus dem Stoff-Feld-Modell direkt Maßnahmen zur Problemlösung abgeleitet: Ist ein elementares System unvollständig, muss es vervollständigt werden. Ist ein Feld oder ein Stoff in seiner Ausprägung nicht erwünscht, kann man es durch ein/-en anderes/-en ersetzen. Dazu empfiehlt sich auch die Verwendung von Sammlungen physikalischer Effekte. Lassen sich unerwünschte Stoffe oder Felder nicht ersetzen, können sie auch durch das Hinzufügen eines weiteren Feldes oder Stoffs in einen erwünschten Zustand umgewandelt werden oder eine unerwünschte Wechselwirkung aufgebrochen werden. ALTSCHULLER (1986) bietet darauf aufbauend eine Sammlung abstrakt formulierter Lösungsstrategien, sog. Standards an, die je nach den identifizierten Konstellationen der Stoffe und Felder angewendet werden können.

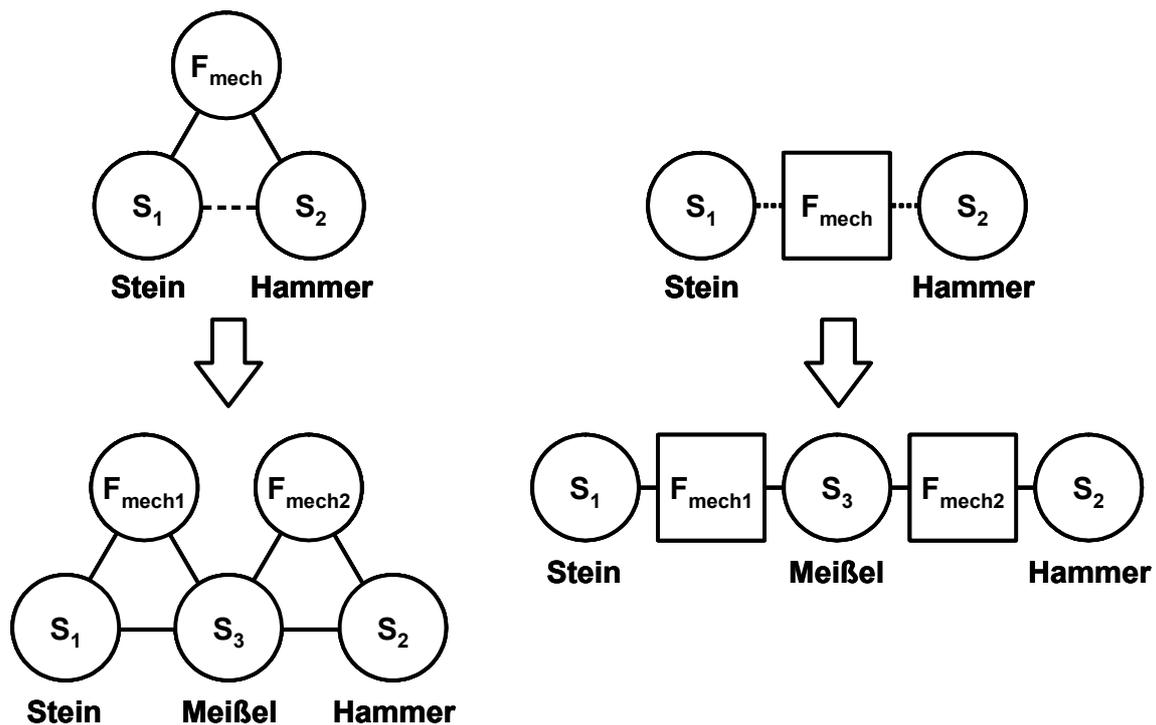


Abbildung 4-3: Darstellung der Stoff-Feld-Analyse. Unterbrochene Linien symbolisieren unzufriedenstellende Wechselwirkungen. Richtungen der Wechselwirkungen sind nicht dargestellt. Im Beispiel wird ein zusätzlicher Stoff (Meißel) eingeführt, um das System zu verbessern. Links: Der Originalversion weitgehend entsprechende Darstellung. Rechts: Selbstklärende Darstellung mit gleichem Inhalt.

Vereinfacht man die etwas verschrobene Nomenklatur der klassischen Stoff-Feld-Analyse, bietet sich hier ein sehr einfaches, systematisches Werkzeug, mit dem sich aus der Analyse direkt starke Lösungsansätze ableiten lassen. Vereinfachungen können dabei die Aufgabe der Richtung von Wechselwirkungen sein, aber auch der Verzicht auf die wenig sinnfällige Anordnung der Elemente zu Dreiecken (vgl. Abbildung 4-3, rechte Bildhälfte). Letztlich unterscheidet sich die Stoff-Feld-Analyse abgesehen von ihrer Darstellung nur darin von den bekannten Wirkungsnetzen (z.B. in DAENZER 2002, S. 558), dass der Fokus auf physikalischen Wechselwirkungen liegt. Der Ansatz nach ALTSCHULLER (1986) dem Entwickler mit den Stoff-Feld-Systemen Standardlösungen an die Hand zu geben, gibt der Methode einen stark präskriptiven Charakter, der in den Staaten des damaligen Ostblocks wohl weniger negativ erschien, als in unserer heutigen, westlich orientierten Gesellschaft; Mit einem Akzeptanzproblem ist damit unter Umständen zu rechnen. Ob man derartige Standardlösungen wirklich braucht darf ohnehin bezweifelt werden: Die Freiheitsgrade bei der Variation eines Stoff-Feld-Systems sind allein dadurch, dass es sich um sehr elementare und damit überschaubare Modelle handelt, sehr beschränkt. Prinzipiell bieten die Standardlösungen nach ALTSCHULLER (1986) kaum mehr Variationen an, als die im vorigen

Absatz beschriebenen. Für einen halbwegs begabten Ingenieur sollte also eine eigenständige Variation eigentlich kein ernsthaftes Problem darstellen.

Dadurch, dass WEPOLs ein vorliegendes Problem sehr stark abstrahieren und strukturieren, ist bei diesem Vorgehen grundsätzlich mit einer intensiven kreativen Anregung des Entwicklers zu rechnen (vgl. Kapitel 3.3.1). Andererseits ist in manchen Fällen die Gefahr eines zu beschränkten Blickwinkels auf die Problemstellung durch diese Methode zu erwarten, da sie eine Systemgrenzenerweiterung eher weniger unterstützt. Die enge Verknüpfung von Analyse und Synthese müsste den Denkschemata des Entwicklers entgegenkommen. „Methodische Schnittstellen“, an denen möglicherweise Information verloren gehen könnte oder erst umständlich übersetzt werden muss, existieren so nicht (vgl. Kapitel 3.5). Aus eigenen Erfahrungen handelt es sich allem Anschein nach um eine sehr effiziente Methode zur Lösungssuche, deren Potenzial ihre Popularität wohl deutlich übersteigen dürfte. Es wird aber erst eine breitere Anwendung der Methode zeigen können, ob diese Vermutung den Tatsachen entspricht.

Eine weitere sehr einfache dialektische Methode zur Lösungssuche ist die von SCHLICKSUPP (1989) beschriebene „Progressive Abstraktion“. Dabei handelt es sich um eine iterativ angewendete Fragetechnik, die den Anwender in ihrer ursprünglichen Form dabei helfen soll, Beziehungen zwischen dem Problem und seinem Zielsystem¹ herauszuarbeiten und die (Abstraktions-) Ebene zu finden, in der die wirkungsvollsten Lösungen gefunden werden können. Dazu entwickelt man zunächst eine Zielformulierung, für die dann in einem zweiten Schritt Lösungen gesucht werden. Diesen Prozess kann man durch die Fragestellungen „Was ist an den Lösungen unbefriedigend?“ und „Gibt es wirkungsvollere Lösungen?“ unterstützen. In einem dritten Schritt erarbeitet man durch die Fragestellung „Worauf kommt es eigentlich an?“ eine neue und nach SCHLICKSUPP (1989) auch abstraktere Zielformulierung. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis man Lösungsansätze gefunden hat, die vielversprechend für die Problemlösung sind (vgl. Abbildung 4-4).

¹ Formuliert man ein Zielsystem, handelt es sich um eine Zielformulierung. Das Zielsystem ist also das dynamische Netz der Teilziele, die der Entwickler glaubt verfolgen zu müssen.

Ausgangsproblem:

Wie kann der Durchsatz von Kaffeefiltertüten aus Papier verbessert werden?

- Lösungen:*
- Verändern der Tütengeometrie
 - Während des Filterns umrühren
 - Unterdruck im Auffanggefäß
 - usw.

Worauf kommt es eigentlich an?

- Extraktionsgrad soll erhöht werden
- Zeit zum Extrahieren einsparen
- usw.

Problemformulierung des ersten Abstraktionsniveaus:

Nach welchen anderen, möglichst überlegenen Verfahren kann man Kaffee extrahieren und trennen?

- Lösungen:*
- Verwendung von Filterpatronen
 - Zentrifugale Trennung
 - andere Filtermembran verwenden
 - usw.

Worauf kommt es eigentlich an?

- Kaffeetrinker möchte schnell und problemlos guten Kaffee zubereiten können!

usw.

Abbildung 4-4: Anwendungsbeispiel für die progressive Abstraktion (nach SCHLICKSUPP 1989).

Eine Variation der Progressiven Abstraktion kann dadurch erfolgen, dass die Fragestellung „Worauf kommt es eigentlich an?“ durch eine speziellere, den Randbedingungen des Problems besser entsprechende Fragestellung(-en) ersetzt wird. Diese von SCHLICKSUPP (1989) vorgeschlagene Variante entspricht damit im Wesentlichen dem von WULF (2002) zur Lösungssuche vorgeschlagenem Vorgehen, das aus kurzen sich abwechselnden „realisierungsorientierten“ (Entwickeln von Lösungsansätzen) und „realitätsorientierten“ Phasen (Bewertung des Lösungsansatzes, präzisiertes Formulieren des Entwicklungsziels) besteht. WULF (2002) bringt dieses Vorgehen zumindest bezüglich des steten Wechsels realisierungs- und realitätsorientierter Phasen in engen Zusammenhang mit einem kognitionspsychologischen Handlungsmodell, dem sog. „Rubikonmodell der Handlung“. Dadurch liegt nahe, dass sowohl progressive Abstraktion als auch das Vorgehensmodell von WULF (2002) dem individuellen Handeln des Entwicklers entgegenkommen dürfte. Durch dieses iterative Vorgehen können sehr effizient Problemlösungen gefunden werden, vor allem dadurch bedingt, dass das Zielsystem fortwährend präzisiert wird.

Ein Ansatz, der ein der o.g. Methoden ähnelnden iterativen Charakter aufweist, stellt die Methode SIL dar (SCHLICKSUPP 1989). Sie zielt primär auf die Bearbeitung eines Problems durch mehrere Bearbeiter ab. Dazu entwickeln alle Beteiligten zunächst für sich Lösungs-

ansätze für eine Problemstellung. Diese werden im Anschluss (in Teams zu je zwei Personen) hinsichtlich ihrer Vorteile gegenseitig bewertet. Aus dieser Bewertung wird ein neuer Lösungsvorschlag erarbeitet, welcher wiederum mit den Lösungsvorschlägen weiterer Teams diskutiert wird. WULF (2002) schlägt eine organisatorisch vereinfachte Form dieser Art und Weise der Lösungssuche vor: Die „pluralistische Lösungssuche“. Auch hier entwickeln die Bearbeiter eigene Lösungsansätze, die anschließend diskutiert („Diskursive Lösungssuche“) werden. Auf Basis dieser Diskussion (und dem dabei veränderten subjektiven Zielsystem) werden erneut individuell Lösungen entwickelt, die wiederum im Team diskutiert werden. Diese Zyklen wiederholen sich, bis sich die Bearbeiter zu einem Handlungsabbruch entschließen.

Die von WULF (2002) beschriebenen Methoden haben in einigen Entwicklungsprojekten ihre Tauglichkeit und vor allem Effizienz gegenüber den im Folgenden diskutierten Kreativitätsmethoden bewiesen. Der Erfolg bei der Pluralistischen und auch Diskursiven Lösungssuche hängt allerdings sehr stark von den zwischenmenschlichen Beziehungen innerhalb des Teams ab. Sollten hier Mängel hinsichtlich der Äußerung konstruktiver Kritik oder der Kritikfähigkeit der einzelnen Bearbeiter bestehen, ist diese Methode zum Scheitern verurteilt. Die von SCHLICKSUPP (1989) vorgeschlagene Methode SIL, die durch ihre Regeln destruktive Kritik zumindest eindämmt, dürfte hier besser angebracht sein. Es ist durch die Anwendung von SIL von einer „erzieherischen“ Wirkung innerhalb des Teams auszugehen, in deren Folge auch eine Pluralistische und Diskursive Lösungssuche ermöglicht wird.

Betrachtet man die vorgestellten dialektischen Methoden, ist auf sachlicher Ebene nicht verständlich, warum sie innerhalb der Konstruktionsforschung keine stärkere Beachtung finden. Es handelt sich allem Anschein nach um prinzipiell sehr einfache und effiziente Methoden, sofern sie nicht wie bei der Urform der Stoff-Feld-Systeme unnötig kompliziert dargestellt werden. Nach Ansicht des Autors beruht ihr Potenzial vor allem auf ihrer im Vergleich zu anderen Methoden deutlichen Nähe zu „natürlichem“ Problemlöseverhalten des Menschen, das eher methodisch unterstützt als verändert wird. Menschen sind keineswegs erst erfinderisch, seit die Konstruktionsmethodik erfunden wurde. Das Vorhaben aus einem theoretischen Hintergrund heraus dem Entwickler Vorschriften machen zu wollen, wie er vorzugehen habe, dürfte letztlich zum Scheitern verurteilt sein. Gerade Konstrukte wie QFD, Szenariotechnik u.a., die den Anwender in der Industrie durch die Komplexität ihrer Anwendung vor mehr Probleme stellen als sie im Endeffekt lösen, und deren Verbreitung trotz intensiver Werbung durch die Forschungsgemeinde wahrscheinlich genau deshalb eher marginal ist, deuten auf diese Entwicklung hin. Auch wenn diesbezüglich immer mehr kritische Stimmen zu vernehmen sind (LINDEMANN 2003A¹), die eine verstärkte Ori-

¹ Proceedings to the conference „Human Behaviour in Design“ (März 2003) mit 34 internationalen Teilnehmern.

entierung der Methodik am Anwender fordern, ist der Paradigmenwechsel in der Konstruktionsforschung noch lange nicht vollzogen.

4.4 Kreativitätstechniken

Nomen est omen: Kreativitätstechniken gelten gemeinhin als „Die Methoden zur Förderung der Kreativität“. Eine Umfrage ergab, dass die Kreativitätstechniken zu den am häufigsten von der Industrie eingesetzten Methoden gehören und darüber hinaus die praktisch einzigen angewendeten Methoden zur Lösungssuche darstellen (GRABOWSKI, 1997).

Unter dem Begriff Kreativitätstechniken sind eine ganze Reihe überwiegend intuitiv geprägter Methoden subsumiert. Ein Schwerpunkt stellt sicherlich das Brainstorming und daraus abgeleitete Variationen wie die z.B. Galeriemethode oder die Methode 6-3-5 dar. Kernidee des Brainstormings ist das Potenzial eines Teams dadurch zu nutzen, dass das Kreativitätshindernis der destruktiven Kritik („Killerphrase, Killerface“) durch vorgegebene Regeln weitgehend ausgeschlossen wird (SIKORA 2001, S. 39). Strenggenommen ist diesem nichts mehr hinzuzufügen. Synergieeffekte sind ja auf das Team an sich zurückzuführen, nicht auf die Methode Brainstorming. Faktoren wie abstrakte Begriffe (Kapitel 3.3.1), Strukturierungen (Kapitel 3.2.2) oder relationale Systembetrachtungen (Kapitel 3.4), die den Abruf von Wissen unterstützen oder gar Integration gruppenexternen Wissens (Kapitel 3.5) und Repräsentationswechsel (Kapitel 3.4) – alles Faktoren, die die Kreativität sehr stark anregen – bietet das Brainstorming prinzipiell nicht.

Erstaunlich in diesem Zusammenhang ist, dass die Unwirksamkeit des „klassischen“ Brainstormings nur fünf Jahre nach der ersten Publikation Osborns im Jahre 1957 von einer Gruppe von Psychologen durch Experimente nachgewiesen wurde. Diese Ergebnisse sind auch heute noch reproduzierbar, es können mittlerweile auch die Effekte nachgewiesen werden, die dafür verantwortlich sind, dass Brainstorming weit hinter den formulierten Erwartungen zurückbleibt (FURNHAM 2000, STROEBE & NIJSTAD 2003).

Es soll hier nicht verschwiegen werden, dass das Brainstorming sehr gut geeignet ist, Teams zu einer konstruktiven Zusammenarbeit zu erziehen. Ein Punkt der ohne Zweifel als sehr wichtig erachtet werden muss. Was hilft Brainstorming in klassischer Prägung allerdings bereits funktionierenden Teams? Teams in denen Kritik vernünftig und damit konstruktiv geübt und auch aufgenommen wird, erhalten durch das Brainstorming keinerlei zusätzliche Unterstützung. Ganz im Gegenteil: Dadurch, dass eine kritische Auseinandersetzung mit Problemstellung und Lösungsansätzen verhindert wird, lernt man in einer solchen Sitzung kaum etwas dazu und entwickelt die eigene Problemsicht nur wenig weiter. In diesem speziellen Fall ist Brainstorming tatsächlich eher hinderlich. Eigene Erfahrungen von Brainstormings, die am Lehrstuhl für Produktentwicklung der TU-München unter den wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt wurden (alles sich gut verstehende

Leute, in der Lage Kritik konstruktiv zu üben und auch anzunehmen), bestärken diese These. Weiter kommt man mit einer Problemstellung meist dann, wenn das eigentliche, in der Regel erkenntnisarme Brainstorming beendet ist, und eine Handvoll verbliebene Kollegen beginnen das Problem und mögliche Lösungen zu diskutieren.

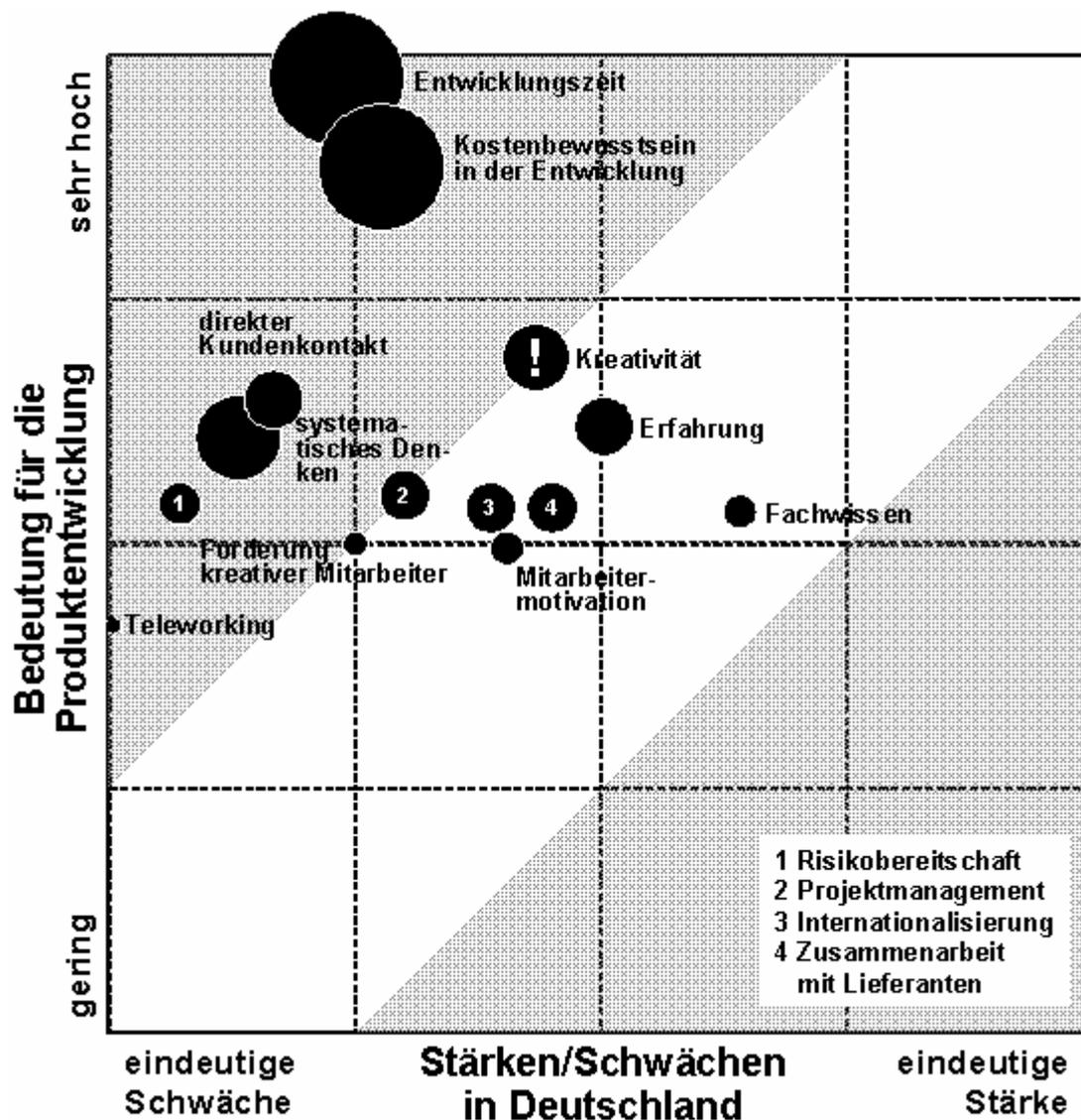


Abbildung 4-5: Erfolgsfaktoren-Portfolio (nach GRABOWSKI 1997, S. 31).

Ein Indiz, dass das Brainstorming weithin als Methode zur Förderung der Kreativität überschätzt wird, lässt sich aus den Umfrageergebnissen in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-5 ableiten: Im Portfolio für zusätzliche (... zu vorgegebenen Faktoren geäußerten...) Erfolgsfaktoren steht „Kreativität“ (und damit implizit der Begriff Innovation) nach „Entwicklungszeit“ und „Kostenbewusstsein der Entwicklung“ hinsichtlich der Bedeutung für die Produktentwicklung an dritter Stelle. Trotz der hohen Bedeutung beurteilen die Befrag-

ten¹ den Punkt „Kreativität“ nicht als Stärke der deutschen Industrie, sondern eher mäßig, tendenziell schon den Schwächen zuzuordnen. Könnte da ein Zusammenhang mit der sehr häufigen und praktisch ausschließlichen Anwendung der Kreativitätstechniken als Methoden zur Lösungssuche bestehen?

Man kann die Wirksamkeit des klassischen Brainstormings durch ein paar einfache Maßnahmen verbessern. Hilfreich ist sicherlich der Aufbau der Lösungssuche auf abstrakten Zielformulierungen. Dadurch werden zumindest Fixierungen gelöst und durch abstrakte Begriffe Assoziationen² weiter gestreut. Sehr gut möglich ist die Kombination mit der Lösungssuche auf Basis der 40 Prinzipien zur Lösung technischer Widersprüche nach ALTSCHULLER (1986). Ob man die Lösungssuche dann allerdings mit dem Begriff Brainstorming oder TRIZ überschreibt, sei dahingestellt.

Neben dem Brainstorming existieren noch weitere Kreativtechniken wie die Synektik und die Reizwortanalyse und Abwandlungen davon. Bei diesen Methoden werden durch die Verfremdung der Problemformulierung bzw. durch willkürlich ausgewählte Worte, die augenscheinlich nichts mit der Problemstellung zu tun haben, weitläufige Assoziationen angeregt (SIKORA 2001, S. 39ff). Vor dem Hintergrund des Aktivationsausbreitungsmodells ist hier in der Tat mit einer im Vergleich zum Brainstorming deutlicheren Anregung der Kreativität zu rechnen. Warum diese Methoden aber entgegen dem Brainstorming in der Industrie keine nennenswerte Verbreitung gefunden haben, ist unklar.

Alles in allem darf allein von den Kreativitätstechniken, insbesondere dem „klassischen“ Brainstorming trotz ihres beeindruckenden Namens nicht allzu viel erwartet werden. Sinn machen sie vor allem bei neu strukturierten, wenig eingespielten Teams, aber auch nur dann, wenn eine ordentliche Problemanalyse durchgeführt wurde. Ansonsten werden die meisten der Lösungen aus einem Brainstorming aufgrund fehlender Angemessenheit verworfen werden müssen. Natürlich bietet sich die Möglichkeit an, Elemente des Brainstormings (z.B. das Kritikverbot) mit anderen Methoden zu kombinieren. Ob man eine solche Methodenanpassung als Weiterentwicklung des Brainstormings bezeichnen möchte oder nicht, scheint eine wenig zielführende Diskussion zu sein.

¹ Darunter Geschäftsführer und Vorstände (20%), Entwicklungsleiter (35%) und Entwicklungsingenieure (16%) aus Maschinenbau (28%), Wissenschaft (9%), Fahrzeugbau (7%), Elektrotechnik (7%), Kfz-Zulieferer (6%), Entwicklung & Beratung (6%), Chemie & Verfahrenstechnik (5%), Anlagenbau (5%), Antriebstechnik (5%), IT & Software (4%), Apparate- und Gerätebau (4%) in Großunternehmen (>5.000 MA, 23%), mittleren Unternehmen (< 5.000 MA, 16%) sowie kleinen Unternehmen (< 500 MA, 63%) (GRABOWSKI, 1997, S. 27).

² Begriffliche Assoziationen gemäß dem Aktivationsausbreitungsmodell (siehe Kapitel 3).

4.5 Externe Information integrierende Methoden

Die Entwicklung technischer Systeme erfordert neben dem Abruf von Wissen auch die Beschaffung und Verarbeitung von (externer) Information. Den Zeitaufwand für die Informationsbeschaffung und -verarbeitung¹ macht dabei nach GRABOWSKI (1997, S.65) und EHRENSPIEL (2003, S. 493) rund 50% der gesamten Arbeitszeit eines Konstrukteurs aus. In stark innovationsgetriebenen Bereichen – etwa in einer Vorentwicklungsabteilung eines Automobilherstellers – dürfte dieser Anteil noch deutlich höher liegen: Je höher der Neuigkeitsgrad einer Erfindung ist, desto „exotischer“ kann die Informationsquelle oder die Information selbst sein, die letztlich zu ihr geführt hat. Die unter dem Begriff Fortschritt einordbare Zunahme von technischem Know-how, sowie die allseits zu beobachtend zunehmende Produktkomplexität dürften den Bedarf an Informationsbeschaffung und -verwertung entweder noch erhöhen, oder - falls eine Erhöhung nicht mehr wirtschaftlich ist - zu einer mangelhaften Berücksichtigung zielführender Information führen². Diese Erkenntnisse sind alles andere als neu, die Betonung der Wichtigkeit von „Informationsmanagement“ – in welcher Form und in welchen Bereichen auch immer – zieht sich durch den Großteil der konstruktionsmethodischen Literatur.

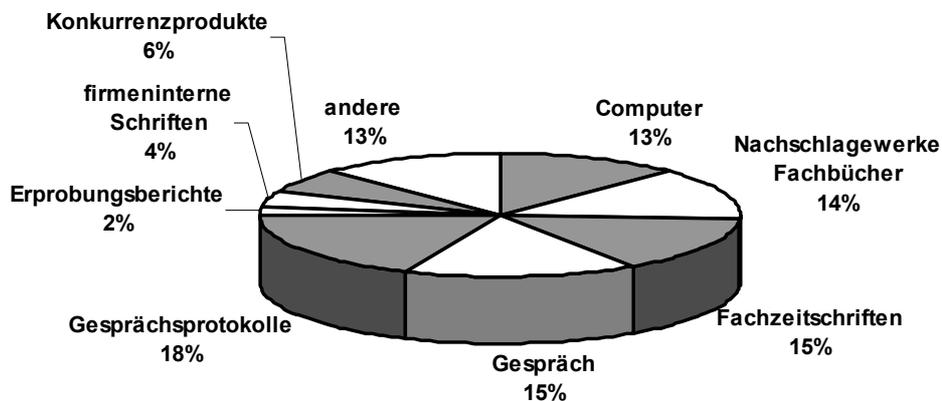


Abbildung 4-6: Anteil der Nutzung verschiedener Quellen bei der Informationsbeschaffung (nach Grabowski 1997, S. 66). Anm.: In der Originalabbildung befindet sich ein Fehler.

¹ In den Quellen eigentlich als Wissenserwerb bezeichnet. Informationsverarbeitung kann hier aber synonym verstanden werden.

² Informationsbeschaffung kostet zunächst einmal Geld (Zeit). Dieser Aufwand muss durch die darauf basierende, wertschöpfende Synthese mindestens kompensiert werden.

Die zumindest innerhalb der Konstruktionsforschung populärsten Werkzeuge, die auf eine effiziente Informationsbeschaffung abzielen, sind Konstruktionskataloge. Abbildung 4-6 nach zu folgern, stellen diese in der Praxis wohl nur einen eher geringen Teil der Informationsquellen dar. Nach GRABOWSKI (1997) sind die wichtigsten Informationsquellen andere Personen und Fachzeitschriften, während Datenbanken wie Patent- und Materialdatenbanken kaum genutzt werden. Diese Paradoxie soll Grund genug dazu sein, Konstruktionskataloge im Folgenden etwas detaillierter zu betrachten.

Den Konstruktionskatalogen zumindest in ihrer Intention ähnelnd, sind die von ALTSCHULLER (1986) entwickelten „innovativen Prinzipien“. Diese aus Patenten abgeleiteten Lösungsstrategien, kann man trotz des sich deutlich unterscheidenden Abstraktionsgrades, als die in den Staaten des ehemaligen Ostblocks entwickelte konstruktionsmethodische Analogie zu den Konstruktionskatalogen bezeichnen. Aufgrund der zunehmenden Popularität dieser Teilmethode von TRIZ ist es naheliegend, diese etwas genauer zu betrachten und in Relation zu Konstruktionskatalogen zu setzen.

Eine Methode (im weitesten Sinne), die sogar die Integration fachfremder Information in die Entwicklung technischer Produkte fördern soll, ist die Bionik. So vielversprechend sich dieser Ansatz anhört – um gute Argumente sind die Protagonisten nicht verlegen – klaffen hier im Vergleich zu den Konstruktionskatalogen Theorie (Wunsch) und Praxis (Realität) noch sehr stark auseinander. Deshalb soll im Anschluss an die Betrachtung der Konstruktionskataloge dieses Thema kritisch hinterfragt werden und das Potenzial der Bionik aus rein konstruktionsmethodischer Perspektive vergleichsweise unideologisch¹ entwickelt werden.

4.5.1 Konstruktionskataloge

Konstruktionskataloge waren in den Anfängen der Konstruktionsforschung – v.a. auf Roth seit 1968 zurückgehend – wesentlicher Bestandteil der Konstruktionsmethodik (PAHL&BEITZ 1993). Seitdem entstanden und entstehen (zwar in weitaus geringerem Umfang als früher) eine Vielzahl von Konstruktionskatalogen. Konstruktionskataloge unterscheiden sich von „konventionellen“ Katalogen wie z.B. dem Kugellagerkatalog eines entsprechenden Herstellers primär darin, dass sie in höherem Maße systematisch geordnet

¹ Tatsächlich weisen viele Veröffentlichungen ideologische Aspekte auf, bei denen Bionik zu einem Instrumentarium zur „Weltrettung“ stilisiert wird – meist leider eher emotional als sachlich. Gerade durch solche Stellungnahmen aber leidet dieses Thema. NACHTIGALL (1998) formuliert dementsprechend: „Bionik ist kein Allheilmittel und kein Glaubensbekenntnis. Bionik stellt ein Werkzeug dar. Man kann es benutzen, missbrauchen oder im Schrank liegen lassen, wie jedes Werkzeug.“ Ob freilich Bionik aus konstruktionsmethodischer Sicht bereits als Werkzeug bezeichnet werden kann oder vielmehr als Idee dazu, wird noch zu diskutieren sein.

sind. Letztlich sind Konstruktionskataloge vorgefertigte Ordnungsschemata (EHRENSPIEL 2003).

Ziele von Konstruktionskatalogen sind (nach EHRENSPIEL 2003 und ROTH 2001):

- Ausschöpfung wenig bekannter Wissensquellen.
- Rationalisierung des Konstruktionsprozesses (Verminderung des Aufwands für Informationsbeschaffung und –verarbeitung, aber auch zur Algorithmisierung und Automatisierung des Konstruktionsprozesses).
- Erleichterung der Konstruktionssynthese (basierend auf der Annahme, dass eine Gesamtlösung durch die Summe ihrer Teillösungen repräsentiert wird. „Je elementarer diese Teillösungen sind, um so mehr sind sie schon bekannt, erprobt und irgend einmal angewandt worden, um so kleiner ist auch ihre mögliche Anzahl.“ (ROTH 2001))
- Ermöglichen eines algorithmischen, später automatisierten Konstruierens (dazu existiert das Algorithmische Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen, „AAK“ nach ROTH (2001)).

Darüber hinaus werden Ziele wie Vollständigkeit, Übersichtlichkeit etc. benannt, die allgemein gültig sind.

Konstruktionskataloge können eindimensional, sowie zwei- und mehrdimensional aufgebaut sein. Letztere sind schlicht Ordnungsschemata, die die Auswahl eines Inhalts über mehrere Parameter erlauben. Durchgesetzt haben sich vor allem eindimensionale Konstruktionskataloge. Diese sind in einen Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil unterteilt.

Der Gliederungsteil klassifiziert die Einträge des Hauptteils. Er ist in seiner Funktion mit dem Inhaltsverzeichnis eines Buches vergleichbar. Mit ihm soll der Zugriff auf geeignete Einträge erleichtert werden, ohne den gesamten Katalog durchzumustern. Im Hauptteil befinden sich die relevanten Objekte, Operationen (Regeln) oder Lösungen, die der Katalog abbilden soll. ROTH (2001) fordert für die Darstellung von Objekten und Operationen Skizzen auf gleichem Abstraktionsniveau, die irrelevante Merkmale nicht darstellen bzw. v.a. für Operationen Gleichungen und Texte. Der Zugriffsteil erhält sachliche Informationen bezüglich relevanter Auswahlmerkmale, etwa Größenordnungen, Randbedingungen und Ähnliches.

Abgesehen von dem Ziel der Algorithmisierung des Konstruktionsprozesses, die in unserer Gesellschaft, in der der Ruf nach Individualismus und Selbstverwirklichung sehr laut ist, nicht auf sonderlich viel Gegenliebe stoßen wird, sowie der Utopie der Automatisierung von Konstruktions- und vor allem Entwicklungstätigkeiten, erscheinen Ziele und Ausprägungen von Konstruktionskatalogen auf den ersten Blick durchweg sinnvoll. Auch der Medienwechsel von Katalogen auf Papierbasis hin zu DV-Systemen, der partiell bereits

vollzogen ist, ist vielversprechend; Nicht zuletzt weil dadurch Sortier- und Suchfunktionen implementiert werden können und Kataloge flexibler werden. Einen Überblick über dementsprechende DV-Systeme bieten SANDER (2001) und BIRKHOFFER & KEUTGEN (1999).

Trotz nahe liegender Vorteile ist die Verbreitung von Konstruktionskatalogen nicht so hoch wie man eigentlich erwarten könnte (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-6). Woran mag dies liegen? Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit keine abgesicherte Untersuchung (etwa in Form einer Umfrage) zur Beantwortung angeboten werden kann, drängen sich plausibel begründbare Hypothesen auf: Sicherlich werden Konstruktionskataloge in bestimmten Bereichen durch konventionelle (Hersteller-) Kataloge verdrängt, deren Inhalte naturgemäß näher an einer Realisierung liegen, kostenlos sind und in der Regel von den entsprechenden Herstellern bei Aktualisierungen automatisch an die potenziellen Endkunden versandt werden. Eine weitere Hypothese für die mangelnde Verbreitung kann sein, dass Konstruktionskataloge in vielen Bereichen auch noch zu statisch sind, das Potenzial von DV-Systemen also nicht ausgeschöpft ist. Konstruktionskataloge in Papierform lassen sich nicht individuell erweitern, geschweige denn durch spezifische Suchabfragen situationsgerecht einsetzen. Denkbare Probleme können aber auch seitens der Wissenschaft zu sehen sein: Konstruktionskataloge sind schon sehr lange bekannt, stehen also fast im Widerspruch zu dem Wunsch neues zu generieren, zu erforschen. Warum sollten Wissenschaftler diese gegenüber der Industrie noch weiter propagieren? Auf der anderen Seite weisen einige Konstruktionskataloge (z.B. ROTH, 2001) eine potenzielle Anwender abschreckende „Verwissenschaftlichung“ auf. Gemeint ist damit die in der Wissenschaft allgemeine sprachliche „Verkomplizierung“ einfacher Zusammenhänge. Zur Verdeutlichung ein Beispiel:

Im Detailkatalog „Geradföhrungen mit Wälzkörpem“ nach ROTH (2001, S. 176ff) findet sich in der ersten Ebene des Gliederungsteils eine sogenannte „Schluss-Matrix“, in der die Richtungen der Belastbarkeit von „Geradföhrungen mit Wälzkörpem“ angegeben wird. Einmal abgesehen davon, dass in der Praxis niemand den Begriff „Geradföhrungen mit Wälzkörpem“ verwendet, sondern in der Katalogsprache der Hersteller schlicht von „Linearföhrungen“ gesprochen wird (bestenfalls noch von „Kugel- oder Rollenföhrungen“), ist die Angabe der Freiheitsgrade und Lastaufnahme über eine Matrix sehr fragwürdig. Dass alle dieser Systeme einen linearen Freiheitsgrad aufweisen ist ja ohnehin Grundbedingung und deshalb namensgebend. Bleiben als Unterscheidungsmerkmal also nur (!) noch, ob sie Momente um ihren linearen Freiheitsgrad aufnehmen können oder nicht. Querkräfte müssen alle diese Systeme aufnehmen können, sonst würde es sich um einen „Tisch“ oder ähnliches handeln. Die quantitative Aussage, wie groß mögliche Belastungen sind, kann man auch ganz einfach sprachlich ausdrücken - die Angabe „01“ für „klein“ und „11“ für „groß“ ist unnötig kompliziert. Man täte ROTH (2001) und anderen Autoren unrecht, würde man die Qualität von Konstruktionskatalogen auf dieses eine Beispiel re-

duzieren. Zumindest eine Tendenz zur wenig anwenderfreundlichen Gestaltung lässt sich aber dennoch ableiten.

Obwohl die Grundidee der Konstruktionskataloge sicherlich richtig und gut ist, lässt sich eine prinzipielle Schwachstelle dieser Form der Informationsbereitstellung identifizieren: Wie in Kapitel 3.2.3 und Kapitel 3.4 dargestellt, sind bildliche Darstellungen sehr gut aufnehmbar und liegen in unserem Gedächtnis stabiler vor als begriffliche. Auf der anderen Seite bieten bildliche Repräsentationen nur eingeschränkte Freiheitsgrade zu ihrer Manipulation. Metaphorisch könnte man sagen, bildliche Repräsentationen sind vorlaut und starrsinnig, also geradezu prädestiniert für gedankliche Lösungsfixierungen. Diese These lässt sich mit den folgenden Beobachtungen in einem realen Entwicklungsprozess erhärten:

Die Beobachtungen wurden in einem Forschungsprojekt zusammen mit einer kleinen Firma, die ein Sicherheitssystem für Bergsportler anbietet, gemacht. Bei dem Sicherheitssystem handelt es sich um einen sogenannten „Lawinenairbag“. Vereinfacht beschrieben ist der Lawinenairbag ein Rucksack, der zwei große Säcke enthält, die mittels einer mitgeführten, stickstoffgefüllten Flasche aufgeblasen werden können. Sind die Säcke gefüllt, „schwimmt“ der Sportler, der in eine Lawine geraten ist auf dieser, vergleichbar mit einer Schwimmweste im Wasser¹. Ziel war die Entwicklung eines Systems, das den Airbag „ferngesteuert“ auslöst. Da dieses System auf Berge getragen werden muss, sollte es sehr leicht und, um nicht unnötig Platz im Rucksack zu verlieren, sehr klein sein. Aufgrund der hier irrelevanten Randbedingungen kristallisierte sich zu einem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess ein Konzept heraus, bei dem eine elektromagnetische Verriegelung bei Bedarf eine gespannte Feder freigibt, die einen Schlagbolzen beschleunigt, der dann eine Platzpatrone zündet². Erschwerend für dieses Konzept ist, dass die Feder mit einer vergleichsweise hohen Kraft zurückgehalten werden muss, auf der anderen Seite aber durch den Elektromagneten, für den nur 6 V DC zur Verfügung stehen, bei vertretbarem Gewicht nur sehr geringe Kräfte aufgebracht werden können. Es galt also das System dahingehend zu entwickeln, dass die Feder über geeignete Übersetzungen mit einer sehr kleinen Kraft freigegeben werden kann.

Der Blick in einen Konstruktionskatalog (ROTH 2001, S. 92 ff) bot auch mehrere Prinziplösungen, um eine derartige Übersetzung – wörtlich „Kraftmultiplikation“ - zu gewährleisten. Zu favorisieren schienen Systeme zu sein, bei denen man eine Übersetzung auch durch

¹ Strenggenommen ist das Bild des Schwimmens auf einer Lawine nicht ganz korrekt. Tatsächlich findet in Lawinen eine Art Sortiereffekt statt. Dieser lässt sich im Experiment z.B. beobachten, wenn man eine Dose mit Müsli vorsichtig schüttelt: Große Partikel werden von kleineren unterkrochen und sammeln sich an der Oberfläche. Der Auftrieb hängt also nicht wie beim Schwimmen allein von der Dichte des Partikels ab, sondern vom Verhältnis von Oberfläche zu Masse.

² Der Gasdruck der Platzpatrone bewegt dann in Folge einen Kolben mit einem Dorn, der die Membran der mit 300 bar gefüllten Stickstoffflasche durchsticht. Dieser Vorgang ist aber an dieser Stelle uninteressant, ebenso wie die (guten) Gründe, die zu diesem Konzept geführt haben.

Reibung erreicht¹. Vielversprechend war die in Schusswaffen verwendete „Abzugsvorrichtung“ (vgl. Abbildung 4-7), die neben der Reibung auch noch eine Übersetzung durch Hebelverhältnisse bietet.

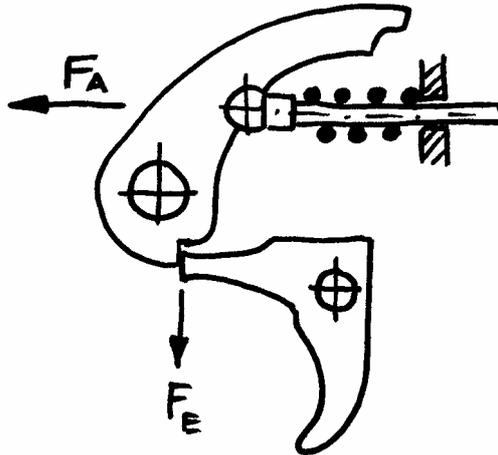


Abbildung 4-7: Kraftmultiplikation durch Ausnutzen des Reibungseffekts, Abzugsvorrichtung (nach Roth 1994, S. 93).

Erste überschlägige Auslegungen, die ich zusammen mit einem Kollegen machte, zeigten bald, dass die im Konstruktionskatalog abgebildeten Hebelverhältnisse keine ausreichende Übersetzung ermöglichten. Als wir die Hebelverhältnisse an unsere Anforderungen anpassten (vgl. Abbildung 4-8 oben), wurde die Anordnung zunächst zu groß, um tatsächlich realisierbar zu sein. Es dauerte relativ lange, bis uns die Schuppen von den Augen fielen: Das Platzproblem war relativ einfach zu lösen, indem man den zu großen Hebel „zusammenfaltet“, den Abzug also entgegen dem Vorbild „über“ die Achse des Schlagbolzens legt. Zwar war die Anordnung immer noch relativ groß, zunächst waren wir aber durchaus kompromissbereit (vgl. Abbildung 4-8 Mitte). Es dauerte einige Stunden (!), bis uns der gedankliche Fehler in unserem Konzept bewusst wurde: Der letztlich aufgrund seiner Größe immer noch störende Hebel bot ja praktisch keine Übersetzung, war also für unseren Fall schlicht überflüssig! Das endgültige Konzept, mit entgegen der Vorlage aus dem Konstruktionskatalog nur einem Hebel, wurde konstruktiv umgesetzt und bot die erwünschte Funktion (vgl. Abbildung 4-8 unten).

¹ Bei einem Reibbeiwert von 0,1 wird eine Kraft gegenüber einer zu ihr senkrechten Kraft auf ein zehntel reduziert.

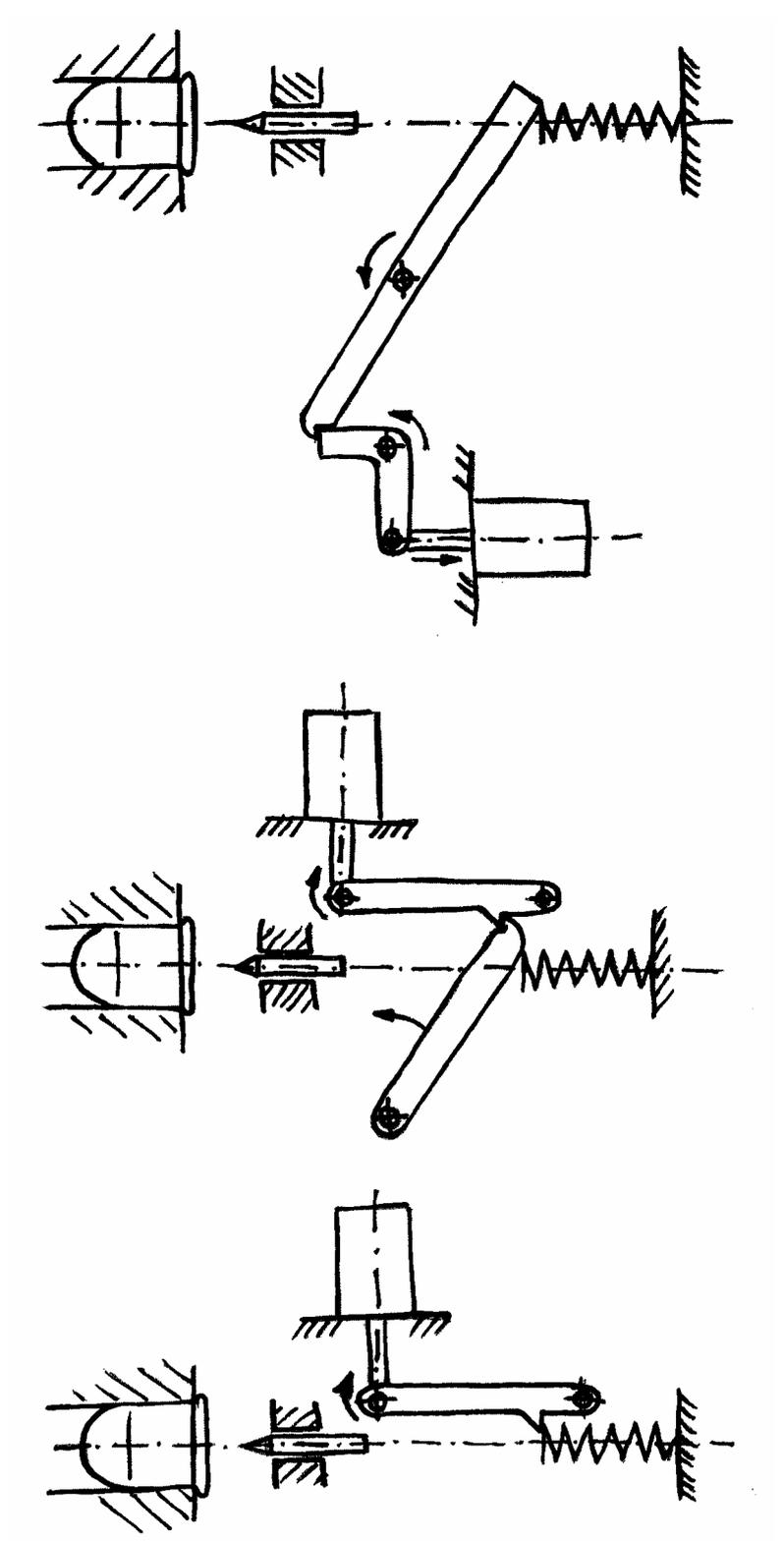


Abbildung 4-8: Drei Stadien im Entwicklungsprozess.

Die Bewertung derartiger „Einzelfallstudien“ ist methodisch prinzipiell kritisch zu sehen (vgl. Kapitel 2.1). Die nun folgende Interpretation der Beobachtungen stellt strenggenommen also keine belastbare Verifizierung oder Falsifizierung der These dar, dass die bildliche Darstellung in Konstruktionskatalogen zu einer Lösungsfixierung führt, liefert aber immerhin ein sehr deutliche Indizien. Die Indizien stützen sich im Folgenden auf eine aus der Reflexion des Prozesses resultierenden subjektiven Einschätzung und einer Interpretation einzelner Besonderheiten des Prozesses vor kognitionspsychologischem Hintergrund.

Der Kollege, mit dem ich die Fernauslösung entwickelte, ist ein vergleichsweise erfahrener Entwickler, mit dem ich in anderen Projekten teilweise komplexere technische Probleme sehr effizient löste. Es handelte sich bei uns also um ein nach unserer Auffassung eingespieltes und in der Vergangenheit auch sehr erfolgreiches Entwicklerteam. Dennoch war es uns ganz offensichtlich nur sehr unzulänglich möglich, uns von der bildlichen Vorlage aus dem Konstruktionskatalog zu lösen. Anhand des Entwicklungsprozesses lässt sich erkennen, dass die Lösung von der Vorlage nur über mehrere unbefriedigende Zwischenschritte erfolgte. Mein Kollege und ich waren einhellig der Meinung, dass uns dabei sogar regelrecht dumme Fehler unterlaufen waren. Beide kamen wir zu der Überzeugung, dass uns die Entwicklung des Endkonzepts schneller und ohne Umwege über unbefriedigende Zwischenergebnisse gelungen wäre, hätten uns als Ausgangskonzept abstrakte Formulierungen des Lösungsprinzips etwa in der Art „nutze zur Übersetzung Reibung und verstärke diese ggf. durch einen Hebel“ vorgelegen.

In der Literatur finden sich keine direkten Nachweise, dass bildliche Darstellungen zu Lösungsfixierungen führen können. Als analoge Repräsentation sind Bilder sehr ökonomisch und erlauben mit einigen Restriktionen eine sehr einfache Manipulation (DÖRNER 1995, S. 297 ff). Darunter ist ein gedankliches „Verformen“ von Bildelementen zu sehen. Im Fallbeispiel äußert sich dies z.B. in Transformationen wie dem „Strecken“ oder „Falten“ der Hebel der Auslösung. Nach DÖRNER (1995, S. 297) erschweren bildliche Repräsentationen aber gerade Strukturänderungen. Dazu zählt z.B. das Weglassen oder Hinzufügen von Teilen. Für Strukturänderungen sind sprachliche Repräsentationen den analogen weit überlegen. Im Fallbeispiel lässt sich auch dies nachvollziehen: Gerade das Weglassen eines für das zweite Konzept zusammengeklappten aber auch völlig nutzlosen Hebels viel bemerkenswert schwer. Größere Strukturänderungen im Fallbeispiel erfolgten erst nach längeren Pausen im Entwicklungsprozess. Diese Beobachtung kann so interpretiert werden, dass erst eine gedankliche Abwendung von bildlichen Darstellungen Strukturänderungen möglich machten. Die Tatsache, dass bildliche Repräsentationen sehr lange und ohne großen Behaltensaufwand im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden können, und dementsprechend erst nach einiger Zeit zerfallen (vgl. Kapitel 3.2.3) ist ein weiteres sehr deutliches Indiz, dass die Lösungsfixierungen im Fallbeispiel durch bildliche Darstellungen verursacht wurden.

Eine Literaturquelle (KRAUSE ET AL 1995, S. 16ff) unterstellt bildlichen Darstellungen eine Verbesserung der kreativen Problemlösefähigkeit. Die Aussage basiert auf Versuchen bzgl. Kreativitätsfaktoren und ist aufgrund der mangelhaften Versuchsmethodik nicht haltbar: Als Problemstellung für die Versuche war ein System zu entwickeln, mit dem sich Kabel unter einer Straße verlegen lassen, ohne den darüber fahrenden Verkehr zu stören. Dieses Problem wurde in Gruppen zu je drei Personen bearbeitet. Der einen Hälfte der Gruppen wurden Bilder aus Patentstudien der letzten 100 Jahre zur Problemlösung vorgelegt, während der anderen Hälfte der Gruppen keinerlei Hilfsmittel angeboten wurden. Wenig verwunderlich erarbeiteten die Gruppen, die Bilder angeboten bekommen hatten, im Schnitt 30% mehr Lösungsprinzipien, als die Gruppe, die keinerlei Hilfsmittel zur Verfügung hatten. Aus diesem Befund zu schließen, dass Bilder der Kreativitätssteigerung dienen, ist grundfalsch: Nachgewiesen wurde lediglich, dass externe Information zu Lösungen verarbeitet wurde. Dies ist weder spektakulär, noch neu. Um eine Aussage zu erhalten, dass Bilder die Kreativität steigern, hätte man den Referenzgruppen nicht Information vorenthalten dürfen, sondern in anderer, z.B. sprachlicher Form vorlegen müssen. Auszüge aus den Patentschriften wären dazu sicherlich geeignet gewesen. Die Untersuchung von KRAUSE ET AL (1995) falsifizieren die Aussage, dass Bilder zu Lösungsfixierungen führen können also nicht.

ROTH (2001, S. 2) selbst weist indirekt auf das Problem der Lösungsfixierung durch (bildliche) Kataloge hin: „Der Nachteil besteht darin, dass häufig mit dem Effekt gleichzeitig auch das Einzelteil oder der Teileverband, durch welchen er realisiert wird, und sogar sein Herstellungsverfahren übernommen wird.“ Es stellt sich letztlich die Frage, ob der Vorteil der schnelleren Aufnahmefähigkeit von bildlichen Darstellungen in Konstruktionskatalogen nicht durch den Nachteil der Lösungsfixierung aufgewogen oder sogar überwogen wird. Ein Katalog (im weitesten Sinne), der im Gegensatz dazu lediglich sprachliche Information beinhaltet, stellen letztlich die im Folgenden diskutierten von ALTSCHULLER (1986) propagierten „Prinzipien zum Lösen technischer Widersprüche“ dar.

4.5.2 Prinzipien zum Lösen technischer Widersprüche

Altschuller entwickelte seit den vierziger Jahren eine „Theorie des Erfindens“ (TRIZ). Die daraus abgeleiteten Methoden und Werkzeuge werden innerhalb eines Vorgehensplans (ARIZ) arrangiert. Zugrunde liegende Philosophie ist die Abwendung von einem Trial and Error Verfahren zur Lösungssuche (Entwickeln von Alternativen) und Hinwendung zu einem auf einem deterministischen Ansatz basierenden Suchalgorithmus (daher auch das „A“ in ARIZ). Diese Philosophie entwickelte Altschuller basierend auf der Recherche

mehrerer hunderttausend¹ russischer Patente² und Analyse rund vierzigtausend „starker Lösungen“³ (ALTSCHULLER 1986, S. 132) zwischen den Jahren 1956 und 1971. Eins der hier näher betrachteten Ergebnisse dieser Analyse ist die Ableitung der „vierzig elementaren Verfahren zur Überwindung technischer Widersprüche“, die von anderen Autoren auch als „40 innovative Prinzipien“, „Verfahrensprinzipie“ und ähnlich bezeichnet werden. Diese seit den siebziger Jahren letztlich unveränderten Prinzipien bieten dem Anwender idealisiert betrachtet das „know-how“ der von Altschuller untersuchten Patente zur Lösungssuche an. Einige Autoren wie SAVRANSKI (2000) und Linde (1993) schlagen weitere, denen von Altschuller teilweise untergeordnete Prinzipien vor.

Die ursprüngliche Intention Altschullers war, dem Entwickler ein Instrumentarium anzubieten, mit dem er unmittelbar aus der Problemanalyse heraus (genauer: aus der Identifikation von Widersprüchen) wenige aber passende Lösungsansätze in abstrakt formulierter Form angeboten bekommt, aus denen er eine Lösung ableiten kann. Die Prinzipien weisen einen mehr oder weniger selbsterklärenden Titel und eine nachfolgende teilweise differenzierende Erklärung auf. Ergänzt wird das Prinzip meist durch ein Beispiel, das oftmals den Patentrecherchen entstammt. Exemplarisch ist Prinzip 18 wie folgt:

18. Prinzip der Ausnutzung mechanischer Schwingungen

- a) Das Objekt ist in Schwingungen zu versetzen.
- b) Falls eine Bewegung bereits erfolgt, ist ihre Frequenz zu erhöhen (bis hin zur Ultraschallfrequenz).
- c) Die Eigenfrequenz ist auszunutzen.

Beispiel: „Verfahren zum Spalten von Holz, dadurch gekennzeichnet, dass zur Verringerung der Kraft, die für das Eindringen des Spaltwerkzeuges in das Holz erforderlich ist, das Spalten mit einem Werkzeug erfolgt, dessen Taktfrequenz der Eigenfrequenz des zu spaltenden Holzes angenähert ist“.

(Urheberschein Nr. 307386)

Abbildung 4-9: Prinzip 18 der 40 Prinzipien nach ALTSCHULLER (1986, S.138).

¹ Es finden sich in den Sekundärquellen auch Zahlen von bis zu 2,5 Millionen Patenten (z.B. HERB 2000, S. 40; <http://ebweb.tuwien.ac.at/bt/> vom 19.03.2003). Wer diese analysiert hat, ist unbekannt. Ein Indiz für Glorifizierung?

² In Russland „Urheberschein“.

³ Unter einer starken Lösung versteht Altschuller letztlich eine Erfindung, die ein besonders kritisches und schwer zu lösendes Problem betreffen. Schwer zu lösen ist ein Problem für Altschuller dann, wenn ein technischer Widerspruch (Zielkonflikt) vorliegt, für dessen Auflösung man bei Trial and Error Vorgehen mehrere hundert bis tausend Lösungsansätze entwickeln müsste.

Dass die Prinzipien einen relativ abstrakten, unverbindlichen Charakter aufweisen, liegt primär an der Art ihrer Erhebung. Erkennbar sind Prinzipien vor allem dann, wenn man ihnen wie bei der Patentrecherche Altschullers mehrfach begegnet. Gerade bei Patenten, die ja gerade Einmaligkeit für sich beanspruchen, ist es also zwangsläufig, dass Ähnlichkeiten nur auf einem lösungsneutralen (weil ansonsten geschütztem) Niveau zu identifizieren sind. Altschuller ordnete die von ihm gefundenen Prinzipien nach der Häufigkeit ihres Auftretens in den untersuchten Patenten an. Dementsprechend ist Prinzip Nr. 1 „Prinzip der Zerlegung“ im Vergleich zu dem letzten Prinzip „...der Anwendung zusammengesetzter Stoffe (Komposite)“ deutlich abstrakter.

Anwendungen der Prinzipien in Studentengruppen wiesen auch im Vergleich zu anderen Methoden eine für viele Teilnehmer unerwartete Anregung zu teilweise auch sehr unkonventionellen Lösungen nach¹. Da hierbei auch ganz offensichtliche Fehler in der Auswahl der Prinzipien gemacht wurden (eine vermeintliche Schwäche der Methode), lässt sich der Anspruch Altschullers nicht aufrechterhalten, dass der von ihm postulierte Determinismus in seiner Methodik vollständig und allein nutzbringend abgebildet sei. Vielmehr legt diese Beobachtung nahe, dass die Prinzipien zunächst unabhängig von ihrem Problembezug, allein durch die Konfrontation mit sehr abstrakten Begrifflichkeiten gemäß des Aktivationsausbreitungsmodells teilweise unkonventionelle Assoziationen ermöglichen (vgl. Kapitel 3.3.1). Damit bedient sich diese Methode entgegen dem Sinn des Erfinders also eines Mechanismus, der dem der Synektik stark ähnelt. Die Beobachtung im Detail:

In einer vorlesungsbegleitenden Übung war es Aufgabe, ein elektrisches Gerät zum Erhitzen von Wasser dahingehend zu optimieren, dass es das Wasser einerseits deutlich schneller erhitzt, andererseits aber weniger Energie verbraucht als bisher. Durch eine im Sinne Altschullers möglicherweise falsche Auswahl wurde für die Lösung des Problems das „Prinzip der Farbveränderung“² ausgewählt. Dieses Prinzip impliziert letztlich die Verwendung von Sichtluken, Beobachtungsscheiben und Ähnlichem, beziehungsweise von Indikatoren um Unsichtbares sichtbar zu machen (z.B. auch die Verwendung von Rauch bei einem Aerodynamischen Versuch), scheint also völlig irrelevant für das Problem. Tatsächlich assoziierte ein Student zum Begriff „Farbe“ den Begriff „Infrarot“ und schlug deshalb vor, das Gefäß des Erhitzers „mit einem Infrarotstrahler anzuleuchten“. Dieser noch sehr fragwürdige Vorschlag regte einen weiteren Studenten zu dem Lösungsansatz

¹ Mehrmalige Beobachtungen innerhalb einer regelmäßig angebotenen Lehrveranstaltung, in der ein Team von zehn Studenten ein technisches Produkt neben Synektik und anderen Kreativmethoden mittels der 40 Prinzipien nach Altschuller lösen sollten. Der Autor betreute dabei vier unabhängige Teams; Gegenteilige Beobachtungen wurden dabei nicht gemacht.

² Prinzip der Farbveränderung: a) die Farbe des umgebenden Mediums ist zu verändern, b) der Grad der Durchsichtigkeit des Objektes oder des umgebenden Mediums ist zu verändern, c) Zur Beobachtung schlecht sichtbarer Objekte oder Prozesse sind färbende Zusätze zu verwenden, d) wenn solche Zusätze bereits angewendet wurden, sind Leuchtstoffe zu benutzen. (ALTSCHULLER 1986, S. 143)

an, ein verspiegeltes Gefäß („Reflexion der Infrarotstrahlen“) ähnlich dem in Thermoskannen zu verwenden, um Verluste über die Gefäßwand zu minimieren. An einem anderen Termin schlug bei der gleichen Gelegenheit ein Student vor, einen Sonnenkollektor (Farbe: schwarz) zum Vorheizen des Wassers zu verwenden. Diese Idee aufgreifend („vorheizen“) entwickelte ein weiterer Student den Lösungsansatz, einen Wärmetauscher zu verwenden, der die Wärme von Abwasser zur Erhöhung der Vorlauftemperatur des Wassererhitzers nutzt.

Wie die Beobachtungen illustrieren, sind Assoziationen nicht zwangsläufig und wohl kaum planbar. Obwohl Altschuller sich aber sehr stark gegen solche intuitive Zufallsprodukte verwahrt (Trial and Error), sind sie in diesem speziellen Fall als sehr positiv zu bewerten. Letztlich bieten die Prinzipien nämlich durch ihre abstrakte Formulierung einerseits Potenzial zu einer systematischen Lösungssuche, andererseits aber eben auch zu einer eher intuitiven Lösungssuche. Es ist evident, dass dieser Ansatz - obwohl so sicherlich nicht geplant - in vielen Fällen ein deutlich höheres Potenzial aufweist durch externe Information den Entwickler bei der Lösungssuche zu unterstützen, als die sehr konkreten Konstruktionskataloge.

So vorteilhaft nach der obigen Darstellung und auch der zunehmenden Popularität dieser Methode nach zu schließen die Verwendung der Prinzipien scheinen mag, weist auch sie noch weiteres Potenzial auf: Ein Faktum, dem man mit Skepsis begegnen muss ist, dass die Grundlage auf der die Prinzipien entstanden eine Patentrecherche ist, die vor dreißig bis vierzig Jahren ausschließlich innerhalb des begrenzten Bereichs des ehemaligen Ostblocks durchgeführt wurde. Dies soll nicht als Abwertung der Leistung der betreffenden Erfinder zu verstehen sein, muss aber andererseits den vor allem in der Sekundärliteratur teilweise gepflegten Absolutheitsanspruch dieser Methode in Frage stellen. Gerade in dem seit Altschullers Recherchen vergangenen Zeitraum entwickelte sich die Prägung technischer Produkte von einer sehr mechanischen hin zu einer mechatronischen. Dass diese Entwicklung nicht neue Prinzipien zur Folge hatte, ist zumindest ziemlich unwahrscheinlich.

Das zunächst nahe liegend erscheinende Durchforsten von Patenschriften nach den Erfindungen zugrunde liegenden Prinzipien widerspricht dem Anspruch auf Vollständigkeit: In der Natur finden sich „Patente“, die Altschuller nicht berücksichtigte. Gerade dieses Potenzial an „Erfindungen“¹ zu nutzen, hat sich die Bionik auf die Fahne geschrieben. Inwiefern dies bereits realisiert ist, soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

¹ Bei den Begriffen „Patente“ und „Erfindungen“ handelt es sich um Metaphern!

4.5.3 Bionik

Das Thema Bionik¹ erfreut sich großer Beliebtheit. Lotuseffekt, Haifischhaut, Vogel- und Insektenflug – das alles und noch einiges mehr gehört zu den Paradebeispielen der Bionik. Populärwissenschaftlich aufbereitet finden sich zahllose Beispiele für die „Überlegenheit“ biologischer gegenüber technischen Lösungen in Form von Büchern mit hochglänzenden Abbildungen, zahllosen Fernsehbeiträgen, Zeitungsberichten und Ausstellungen – Bionik ist in aller Munde. Und das scheinbar zu Recht: Tatsächlich zeigen sich bei vergleichbaren Randbedingungen in Technik und Natur belebte Lösungen, die in weitaus stärkerem Maße optimiert sind als ihr technisches Pendant. Oft lässt sich beobachten, dass sich natürliche Systeme vor allem darin auszeichnen, dass nicht nur stur in eine Richtung optimiert wurde, sondern in der Regel mehrere Strategien gleichzeitig zum Tragen kommen. So weist die Oberfläche der Lotuspflanze nicht nur eine hydrophobe und damit schwer zu benetzende Wachsschicht auf, sondern auch eine Oberflächenstruktur, die für den bekannten Selbstreinigungseffekt die Benetzbarkeit zusätzlich um ca. 50% herabsetzt. Haie haben nicht nur eine strömungsgünstige Körperform, sondern auch eine widerstandsmindernd strukturierte Hautoberfläche. Delfine nutzen nicht nur ihre Körperform, sondern auch eine spezielle duktile Unterhautschicht zur Widerstandsminderung, durch deren Nachgiebigkeit das Ablösen der Strömung verhindert wird. Es ist sicherlich unbestritten, dass die Natur eine Vielzahl für die Technik interessante Lösungen bereithält.

Der kritische Leser wird sich nun zu Recht fragen, warum es bei dem oben beschriebenen Potenzial letztlich doch nur relativ wenige Produkte gibt, die tatsächlich auf Basis biologischer Vorbilder entwickelt wurden. Bei einer genaueren Recherche muss man darüber hinaus leider feststellen, dass unter der geringen Zahl an realisierten „bionischen“ Produkten ein deprimierend hoher Anteil an Produkten zwar unter dem Begriff der Bionik angepriesen wird, aber nicht im Entferntesten in diesem Sinne entwickelt wurde – Bionik ist in letzterem Fall lediglich ein Werbezweck. Ist das Thema Bionik demzufolge eine Ente?

Bionik kann nur dann erfolgreich sein, wenn der Informationstransfer von der Biologie in Produkte entwickelnde Firmen auch tatsächlich stattfindet. Der Bedarf zu diesem Informationstransfer kann nicht „von oben“ verordnet werden, er muss aus den technischen Prob-

¹ Es finden sich zahlreiche Angaben über die Herkunft dieses Begriffs. Folgende Version scheint die allgemein gebräuchlichste zu sein: Bionik gilt als Kunstwort, das aus den Begriffen Biologie und Technik gebildet wird. Die Schöpfung dieses Kunstwortes (engl.: „bionics“) wird dem Luftwaffenmajor J.E. Steele zugeschrieben, der dieses 1960 auf einem Kongress prägte (NACHTIGALL 1998). Nachtigall beschreibt die Bionik als Synthese betreibende Disziplin. Die analytische Vorarbeit dazu wird von der sog. technischen Biologie geliefert, die als eigene Wissenschaftsdisziplin (nicht zu verwechseln mit der Biologie im Allgemeinen) Konstruktionen und Verfahrensweisen der Natur unter Einbeziehung der Analyse- und Descriptionsverfahren von Physik und Technik untersucht und beschreibt.

lemstellungen der Entwicklungsabteilungen resultieren. Im Idealfall ist Bionik also eine Methode zur Lösung technischer Probleme. Gerade in der Industrie stoßen wir aber auf Randbedingungen, die den angestrebten Informationstransfer deutlich erschweren:

Der in der Regel vorherrschende Termindruck für die Produktentwicklung bedingt in der Praxis, dass auch die Zeit für intensive Recherchen kaum zur Verfügung steht. Ob das wirklich so sein muss, geschweige denn ob dies wirklich sinnvoll ist, ist mehr als fraglich, aber zunächst einfach ein Faktum, das wohl nicht von heute auf morgen aus der Welt geschafft werden kann. Die Situation verschärfend kommt hinzu, dass in Entwicklungsabteilungen primär Ingenieure, vereinzelt Physiker und Chemiker arbeiten, die durch die technische Orientierung ihrer Ausbildung meist nur über ein sehr beschränktes Wissen bezüglich Biologie, vor allem aber kaum über den Zugang zu entsprechender Information verfügen. Auch diese Randbedingung ist sicherlich nicht wirklich sinnvoll und unumstößlich, erhöht derzeit aber den Aufwand für Recherchen enorm.

Faktoren, die den angestrebten Informationstransfer erschweren, liegen aber nicht nur auf der Seite der Industrie. Die Biologie untersucht hochkomplexe, in Struktur und Wechselwirkung ihrer funktionellen Elemente noch weitgehend unbekannte Systeme (ZERBST 1987, S. 19). Die dahinter zu sehende Zielsetzung beruht rein auf der Analyse dieser Systeme, also auf Wissenszuwachs. Selbstverständlich betreiben die Ingenieurwissenschaften und auch die Industrie Analyse, aber entgegen der Biologie nicht aus Selbstzweck, sondern um (technische) Problemstellungen zu lösen. Entsprechend unterschiedlich wird in Biologie und Technik Information aufbereitet und teilweise auch klassifiziert.

Vereinfachend kann man sowohl im Maschinenbau als auch in der Biologie zwei prinzipielle Ebenen zur Klassifikation von Information identifizieren. Das ist einerseits die Ebene der Teildisziplinen wie z.B. Zoologie und Botanik in der Biologie oder Werkstoffkunde, Mechatronik und ähnliches in den Ingenieurwissenschaften, andererseits die Ebene der „Systemelemente“ wie z.B. Wirbeltiere, Gräser usw. oder Lager, Strömungsmaschinen und ähnliches. Hierarchien sind dabei nicht zwingend eindeutig, die Übergänge sind meist fließend. Deutlich wird dies bei der Betrachtung von Bibliothekssystematiken. Als Beispiel sind die übergeordneten Systematiken der Fachbibliotheken Biologie und Maschinenbau der Universität Kaiserslautern und der TU-München aufgeführt.

Biologie	
Kaiserslautern	TU-München
T Allgemeine Biologie	T Allgemeine Biologie
T Biochemie	T Mikrobiologie
T Biophysik	T Botanik
T Pflanzenphysiologie	T Allgemeine Botanik
T Mykologie	T Systematische Botanik
T Mikrobiologie	T Zoologie
T Genetik und Molekulargenetik	T Allgemeine Zoologie
T Evolution	S Spezielle Zoologie
T Paläontologie	S Humanbiologie
T Cytologie	
T Pflanzenmorphologie, -anatomie, -histologie	
S Pflanzensystematik, spezielle Botanik	
S Floristik, Pflanzengeographie, Bestimmungsbücher	
T Ökologie	
T Naturschutz, Umweltschutz	
T Zoologie	
S Spezielle Zoologie, zoologische Systematik	
T Entomologie	
S Wirbellose	
S Ornithologie	
S Wirbeltiere	
T Tierphysiologie	
T Kybernetik	
T Bioakustik	
T Ethologie, Verhaltensforschung	
T Angewandte Biologie	

Abbildung 4-10: Systematiken der Bibliotheken der Uni Kaiserslautern und der TU-München im Bereich Biologie vom Juli 2002 (T: Teildisziplin, S: Systemelement).

Maschinenbau	
Kaiserslautern	TU-München
T Naturwissenschaftliche Grund- und Hilfswissenschaften	T Konstruktion im Maschinenbau; Maschinengestaltung
T Technische Grund - und Hilfswissenschaften	T Montage; Flexible Montage
T Technologie und Technik allgemein	T Reibung, Verschleiß, Schmierung (Tribologie)
T Maschinenbau	S Maschinenelemente
T Verfahrenstechnik / Chemische Industrie	S Lager
T Werkstoffkunde und Fertigungstechnik	S Achsen und Wellen
T Verkehrstechnik, Luft- und Raumfahrt	S Dichtungen (Dichtungsmasse)
T Energiewirtschaft und Umwelttechnik	S Kraftübertragung; Antriebstechnik
T Umweltschutz und Umwelttechnik	S Getriebe
T Arbeits- und Unfallschutz	S Verzahnung
T Rechts- und Sozialwissenschaften	S Zahnradarten und Getriebegrundformen; Zahnräder; Zahnradgetriebe
	S Rohre; Rohrleitungen
	S Behälter
	S Dampferzeugung; Dampfkessel
	S Kraft- und Arbeitsmaschinen
	S Kraftmaschinen
	S Verbrennungsmotoren; Brennkraftmaschinen
	S Strömungsmaschinen (Turbomaschinen); Strömungskraftmaschinen
	S Arbeitsmaschinen; Turboarbeitsmaschinen
	T Fluidtechnik
	S Ölhydraulik; Hydromotor
	S Pneumatik; Drucklufttechnik
	S Fördertechnik; Förderer
	S Lagertechnik; Verpackungstechnik
	T Kältetechnik
	T Tieftemperaturtechnik (Kryogenik)
	T Hochtemperaturtechnik
	S Heizungs-, Lüftungs-, Klimatechnik
	T Vakuumtechnik
	T Hochdrucktechnik

Abbildung 4-11: Systematiken der Bibliotheken der Uni Kaiserslautern und der TU-München im Bereich Maschinenwesen vom Juli 2002 (T: Teildisziplin, S: Systemelement).

Es ist offensichtlich, dass zur gezielten Suche nach fachübergreifender Information in Bibliotheken bereits ein gewisses Maß an Fachwissen nötig ist. Die Verständnisprobleme können für den Techniker auf Ebene der biologischen „Systemelemente“ noch zunehmen, da hier unter anderem ein phylogenetisch¹ geprägter Schlüssel zur Klassifikation zur Anwendung kommt:

Organismen treten nicht in beliebigen Merkmalskombinationen auf, sondern in diskreten Einheiten - als biologische Arten. Linné, der 1739 in seiner „Systema naturae“ einen ersten umfassenden Klassifikationsversuch solcher Arten unternahm, beschrieb 4235 Tierarten.

¹ „stammesgeschichtlich“. Stämme (singular: „Phylum“) sind definierte Gruppen von Lebewesen, die sich auf relativ abstraktem Niveau ähneln. Der Mensch gehört dem Stamm der Wirbeltiere („Vertebraten“) an. Wie der Name schon verrät, haben alle diese Tiere eine Wirbelsäule. Dazu zählen Schädellose, Kieferlose, Fische, Amphibien, Reptilien, Vögel und Säugetiere.

Inzwischen ist die Zahl bekannter und taxonomisch¹ erfasster Tierarten auf etwa 1,2 Millionen angewachsen. Ihnen stehen 400.000 Pflanzenarten gegenüber (WEHNER&GEHRING 1992, S.540). Lebewesen werden in der Biologie folgendermaßen klassiert: Auf höchster Ebene ist die Unterscheidung in Pflanzen und Tiere zu sehen. Dabei werden Pilze den Pflanzen und Bakterien den Tieren zugeordnet, was der prinzipiellen Systematik zwar widerspricht, aufgrund historischer Entwicklungen aber bis heute beibehalten wurde. Tiere lassen sich nach dem in der Biologie üblichen System in Tierstamm (phylum), Klasse (classis), Ordnung (Ordo), Familie (familia), Unterfamilie (subfamilia), Gattung (genus), Art (species) und Unterart (subspecies) einteilen. Diese starke hierarchische Strukturierung ist notwendig, um die Fülle unterschiedlicher Arten greifbar zu machen. Die klassifizierenden Bezeichnungen werden in Latein bzw. Griechisch vergeben, deren Endung die Klassifikationsebene angibt. Deutsche Bezeichnungen sind sog. Trivialnamen und nur für einen Teil der Lebewesen vergeben. Erblickt man zum Beispiel in Deutschland eine Biene auf einer Blüte, handelt es sich in vielen Fällen um die Unterart der *Apis mellifera ligustica* (Italienerbiene). Diese gehört der Art der *Apis mellifera* (Westliche Honigbiene), der Gattung *Apis* (kein Trivialname), der Unterfamilie *Apinae* (Honigbienen), der Familie *Apidae* (Echte Honigbienen), der Ordnung *Hymenoptera* (Hautflügler), der Klasse *Insecta* (Insekten) und schließlich dem Stamm *Arthropoda* (Gliederfüßler) an. Da Differenzierungsmerkmale in der Natur sehr mannigfaltig sein können, sind zur Klassifizierung teilweise noch Zwischenebenen nötig. So kann zum Beispiel die genannte Italienerbiene noch der Unterordnung *Apocrita* (Hautflügler mit „Wespentaille“) und der Überfamilie *Aculeata* (Stachelwespen) zugeordnet werden.

Die oben aufgeführten Beispiele sollen verdeutlichen, dass zwischen Biologie und Technik Informationsbarrieren liegen, die vor allem aus der Technik kommend nicht ohne eine solide Wissensbasis überschritten werden können. Versucht nun ein Entwickler eine technische Lösung mittels Bionik zu finden, muss er aber genau diese Barriere überwinden. In dieser Situation Arbeitsmethoden einzusetzen, drängt sich förmlich auf. Tatsächlich existieren auch diesbezügliche Ansätze, die im Folgenden kritisch durchleuchtet werden sollen.

4.5.3.1 Methodische Ansätze für die Bionik

PAHL&BEITZ (1993, S. 89) charakterisiert die Bionik (hier: „Analyse natürlicher Systeme“) sehr optimistisch als „konventionelle Methode und Hilfsmittel“, womit die Bionik in einem Atemzug mit Methoden wie Literaturrecherche, der Analyse bekannter technischer Systeme, Analogiebetrachtungen und Messungen bzw. Modellversuchen genannt wird.

¹ taxonomisch erfasste Tierarten sind schlichtweg alle, die in die biologische Systematik der Arten eingeteilt wurden.

Bezüglich der Charakterisierung der Bionik als intuitiv bzw. diskursiv betonte Methode herrscht keine einheitliche Meinung in der Literatur vor. In manchen Bereichen wird bereits dann von Bionik gesprochen, wenn die Analogiebildung einer Synektiksituation auf Basis biologischer Systeme erfolgt (SIKORA 2001, S. 66). An anderer Stelle ist die Bionik durch ein bewusst systematisches Vorgehen eindeutig den diskursiv betonten Methoden zuzuordnen (siehe hierzu auch das Vorgehensmodell von ZERBST (1987, S. 29). Beide (extreme) Positionen stehen nicht unbedingt in Widerspruch. Da die Übernahme und Adaptation biologischer Vorbilder für technische Entwicklungen eine systembedingte Zielorientierung und Eingrenzung des Lösungsraums mit prinzipiell vereinheitlichbaren Vorgehensschritten (zumindest Denkmustern) einhergeht, ist die Bionik aber in höherem Maße den diskursiv betonten Methoden zuzuordnen.

Die bemerkenswertesten methodischen Ansätze für die Bionik gehen keineswegs auf die Ingenieurwissenschaften zurück, obwohl auf dieser Seite eigentlich der vermeintlich größere Bedarf dafür besteht. Im Folgenden sind die Ansätze nach ZERBST (1987) und HILL (1997) beschrieben.

Ansatz nach Zerbst:

Frühe von Rechenberg (1973) entwickelte methodische Ansätze für die Bionik wurden von ZERBST (1987) aufgegriffen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um eine algorithmisierte Suchstrategie (vgl. Abbildung 4-12), die um eine Sammlung biologischer Prinzipien, die nach „Disziplinen der Bionik“¹ geordnet ist, erweitert wird. In einem ersten Schritt dieser Suchstrategie (1-2) werden dabei zu technischen Funktionen analoge Entsprechungen in der Biologie gesucht. Ähneln sich diese Funktionen, werden in einem zweiten Schritt (3-4) die technischen und biologischen Randbedingungen miteinander verglichen. Die Ähnlichkeit dieser Randbedingungen ist nach Zerbst ausschlaggebend für eine technische Umsetzbarkeit des biologischen Vorbildes. Sind auch die Randbedingungen ähnlich, kann zum Schritt drei (5-6) übergegangen werden, bei dem die sog. Gütekriterien der beiden Systeme miteinander verglichen werden. Unter Gütekriterien werden dabei die Eigenschaften eines Systems verstanden, die maßgeblich für seine Leistungsfähigkeit sind (z.B. Gewicht, Festigkeit, Leistungsdichte, ...). Technische und vor allem biologische Systeme sind auf spezifische Gütekriterien hin optimiert. Vorausgesetzt die Gütekriterien ähneln sich, kann nach Zerbst das biologische System als Vorbild für eine technische Umsetzung dienen.

¹ Spezielle Energebionik (Strukturen biol. Energieversorgung, Energiespeicherung, etc.), Struktur-Bionik (Bionik zusammengesetzter Materialien, multifunktionale bionische Architekturprinzipien, etc.), physiologische Bionik (Transportsysteme, Bionik der Lokomotionsmechanismen, etc.), Chronobiologie (Zeitmessung, etc.) und Neurobionik (zentrales Nervensystem, Neuronennetze, etc.)

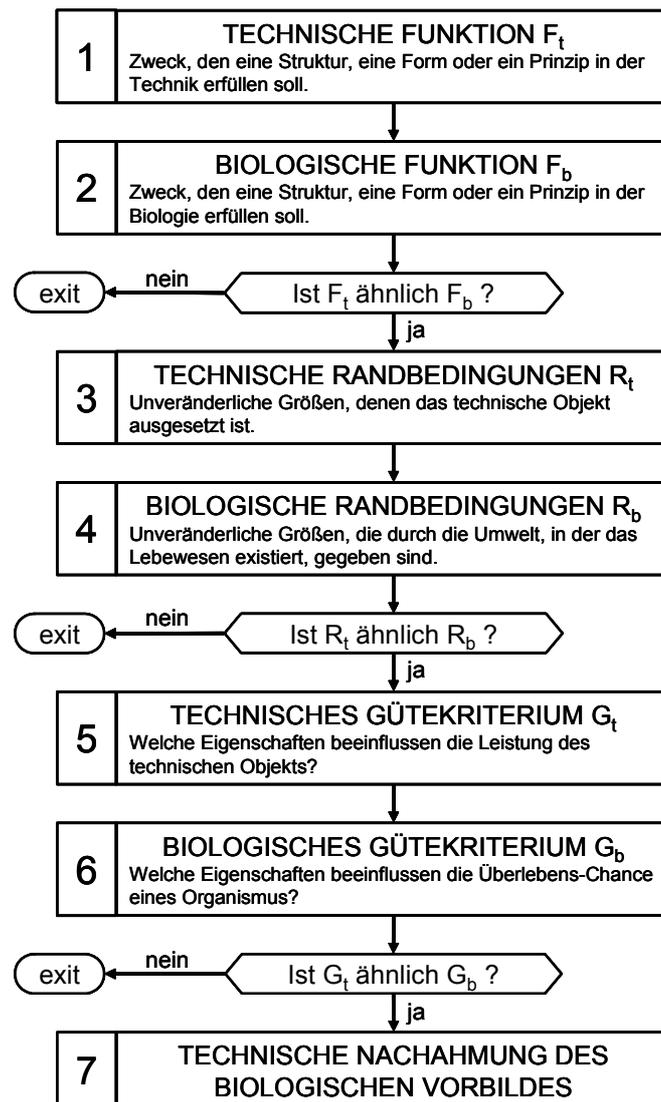


Abbildung 4-12: Vorgehen nach ZERBST 1987.

Neben zahlreichen sehr positiven Elementen der Arbeit Zerbsts ist eine Widersprüchlichkeit zwischen der angebotenen Suchstrategie und der Beschreibung biologischer Prinzipien zu identifizieren. Die Suchstrategie engt den Lösungsraum dahingehend ein, dass biologische Vorbilder folglich nur dann übertragbar sind, wenn sie ein nahezu exaktes Abbild des zu entwickelnden technischen Systems darstellen. In sich ist diese Suchstrategie zwar korrekt, die Möglichkeit, ein biologisches Vorbild auf abstrakter Ebene zu nutzen, wird dadurch allerdings in keiner Weise gefördert. Dass eine Übertragung von Vorbildern auf abstrakter Ebene nicht nur möglich, sondern auch sinnvoll ist, zeigt sich bereits in der Samm-

lung biologischer Prinzipien¹. Aufgrund des Abstraktionsniveaus dieser Prinzipien sind die Randbedingungen und Gütekriterien für eine mögliche Anwendung auf technische Systeme praktisch irrelevant. Je abstrakter ein Prinzip formuliert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit seiner Anwendbarkeit (siehe dazu auch Kapitel 4.5.2).

Ansatz nach Hill:

Die von HILL (1997) propagierte Methodik zur Übertragung biologischer Vorbilder in die Technik weist eine intensive Verwandtschaft zu der von Altschuller entwickelten Methodik TRIZ beziehungsweise zu deren Derivat WOIS auf (LINDE 1993). Das empfohlene Vorgehen lässt sich in zwei Blöcke gliedern:

Der erste Block („Zielbestimmung“) dient der „Formulierung der Entwicklungsaufgabe mit erfinderischer Zielstellung“. Dazu werden beginnend mit der „Untersuchung der Markt- und Bedarfssituation“ über die „Durchführung einer Systemanalyse“, „Erfassung des Stands der Technik“ und einigen weiteren, hier nicht näher erläuterten Schritten der Problemstellung zugrundeliegende Widersprüche („Paradoxien“) erfasst. Dieses Vorgehen weist eine sehr hohe Affinität zu der Methodik WOIS auf (siehe auch LINDE 1993), und ist allein dadurch prinzipiell unabhängig von einer nachfolgenden Lösungssuche mittels Bionik.

Der zweite Block („Lösungsfindung“) beschreibt ein sequenzielles Vorgehen zum Auffinden und Übertragen biologischer Vorbilder. Die entsprechenden Teilschritte gestalten sich wie folgt:

- „Bestimmung der den widersprechenden Forderungen zugrundeliegenden Grundfunktionen“: Die Grundfunktionen werden zur Klassifizierung eines „biologischen Lösungskatalogs“ eingeführt. Dazu werden die in der Konstruktionsmethodik altbekannten fünf Grundfunktionen (Übertragen, Stützen/Tragen, Formen, Verbinden/Trennen, Speichern/Sperren) drei Umsatzprodukten (Stoff, Energie, Information) gegenübergestellt. Dementsprechend ergeben sich 15 Klassen.
- „Aufdeckung relevanter biologischer Strukturen mit gleichen oder ähnlichen Funktionsmerkmalen“: Hill bietet dem Bearbeiter bei diesem Schritt Kataloge mit 191 potenziellen biologischen Vorbildern samt Beschreibung an. Dieser Katalog ist nach den 15 Klassen, die sich aus den Grundfunktionen und Umsatzarten ergeben, geordnet.
- „Zusammenstellen relevanter Strukturen in einer Tabelle und Ableitung erster Lösungsansätze (Prinziplösungen)“: Bei diesem Schritt handelt es sich um die Dokumentation der aus den Katalogen ermittelten biologischen Strukturen. Auf Basis dieser (tabellarischen) Dokumentation sollen erste Lösungsansätze entwickelt werden.

¹ ZERBST (1987, S. 127ff) beschreibt hier denkbare technische Anwendungen für Osmose wie z.B. einen Konverter zur Energieerzeugung an Flussmündungen (Süß- und Salzwasser), der den osmotischen Druck zum Antrieb eines Generators nutzt oder einer Dialysebatterie (ebenfalls Süß- und Salzwasser) zur direkten Stromerzeugung. Beide Beispiele sind in ihrer Gestalt und in ihrem Funktionsprinzip sehr weit von biologischen Vorbildern entfernt.

- „Übertragung der ermittelten Lösungsansätze in eine technische Lösung entsprechend Anforderungen, Bedingungen“: In diesem Schritt sollen erste technische Konzepte entstehen.
 - a. „Variieren und/oder“ Kombinieren relevanter Merkmale: Dieser Schritt entspricht den aus der Konstruktionsmethodik bekannten Verfahren wie die Anwendung von Variationsmerkmalen (Form, Größe, Bewegungsart, ...) und das Aufstellen von Ordnungsschemata/ morphologischen Kästen.
 - b. „Bewertung von Lösungselementen bzw. technischen Varianten“: Hierbei sollen bekannte Bewertungsmethoden zum Einsatz kommen.
- „Ausgestaltung der technischen Lösung“: Dieser Schritt umfasst die Detaillierung des ausgewählten Konzepts.

Zusammenfassend betrachtet, bietet die von Hill entwickelte Methodik ein hinsichtlich der Lösungssuche der Bionik relativ unspezifisches Vorgehen, in welches ein nach Grundfunktionen und Umsatzarten geordneter Katalog mit biologischen Strukturen integriert ist. Diese Strukturen werden primär dargestellt, eine (physikalische) Beschreibung der Strukturen, die erklärt, warum sie sich gerade in der beschriebenen Form entwickelt haben (Optimierungsziel), sowie Randbedingungen fehlen in den meisten Fällen. Hill bietet mit dem von ihm entwickelten Katalog bionischer Strukturen erstmals ein kompaktes Werkzeug an, das die Suche nach Analogien für Techniker erleichtern kann. Hinsichtlich der weiteren Informationsbeschaffung, die in vielen Fällen für eine technische Umsetzung notwendig sein kann, erfolgt hier keine Unterstützung.

Das Angebot an spezieller methodischer Unterstützung zur Lösungssuche mittels Bionik ist also relativ dürftig: Es existiert kein Vorgehensmodell, das flexibel und gleichzeitig spezifisch genug wäre, um technisch ausgebildeten Personen bei einer derartigen Lösungssuche zu unterstützen. Ebenso gibt es kaum Werkzeuge, die den Zugang zu Information aus der Biologie für Techniker erleichtern. Information über natürliche Systeme ist darüber hinaus nur sehr selten für technische Fragestellungen aufbereitet. Man kann sich nun fragen, ob dieser augenscheinliche Mangel ein historisch gewachsener ist, oder ein systembedingter, ob er also behoben werden kann oder nicht. Das nächste Kapitel soll eine Beantwortung dieser Frage versuchen.

4.5.3.2 Fallstudien

Betrachtet man die historische Entwicklung von Naturbeobachtung und Technologie, wird deutlich, dass in technologischen Anfängen natürliches Vorbild und die technische Umsetzung oft dicht beieinander lagen. Die Vermutung, dass Technologie also zunächst auf Analogien zu natürlichen Systemen basierten, liegt nahe: Die Entwicklung im Ackerbau von der bloßen Hand zur Feldbestellung über die Hacke zum Pflug, der schließlich nicht mehr selber gezogen wird, zeigt sehr anschaulich den sehr naturähnlichen Beginn einer Techno-

logie, die sich dann aber zunehmend von ihrem Vorbild entfremdet. Dass dieser Prozess sich nicht allein auf vorgeschichtliche Erfindungen bezieht, zeigen auch die ersten Modelle von Flugzeugen, die eine deutliche Gestaltähnlichkeit zu Vögeln aufweisen. Dennoch fand seit der Industrialisierung eine zunehmende Verselbständigung der Disziplinen Biologie (Naturbeobachtung) und Technik statt. Dieser Prozess dürfte mit dem Wissenszuwachs innerhalb der einzelnen Disziplinen zusammenhängen, der eine zunehmende Spezialisierung notwendig macht. Heutzutage ist selbst unser Alltag so komplex, dass die meisten Leute zwar ein Handy bedienen können, aber die Frage wie der Baum vor ihrem Fenster heißt, wie er sich fortpflanzt oder gar Stoffwechsel betreibt, nicht beantworten können. Probleme bei der Anwendung von Bionik stellen sich bei dieser Betrachtung also primär als individuelle Wissenslücke dar. Die Anwendung von Bionik als Methode ließe sich in diesem Szenario durch Modifikationen in der Ingenieurausbildung fördern – ein durchaus gangbarer Weg.

Hinter der Entfremdung von Natur und Technologie kann nicht nur das oben skizzierte Kompetenzproblem gesehen werden, sondern auch ein prinzipielles: Für technische Systeme haben wir Randbedingungen geschaffen, die sich von denen lebender Systeme unterscheiden, obwohl jedes technische System letztendlich in ein biologisches eingebunden ist. Man kommt bei diesem Thema sehr schnell in eine Diskussion über Nachhaltigkeit, die hier aber nicht angestrengt werden soll. Fakt ist, dass sich heute sowohl technische Ober-systeme als auch etablierte technische Prinzipien erheblich von natürlichen Vorbildern unterscheiden: Stoffkreisläufe und Stoffe selbst unterscheiden sich deutlich, Geldwirtschaft als Motivation ist für die Natur irrelevant, Rotationen kennt die Natur bis auf eine Ausnahme im Nanometerbereich nur in einem Winkelbereich deutlich unter 360 Grad – die Liste der Unterschiede lässt sich scheinbar beliebig fortsetzen. Betrachtet man nun die Hartnäckigkeit mit der einmal eingeschlagene Wege in der Technik beibehalten werden – Evolution statt Revolution – dürfte es utopisch sein, die deutlichen Unterschiede zwischen Technologie und belebter Natur von heute auf morgen umkrepeln zu wollen. Das soll kein Persilschein sein auf Nachhaltigkeit zu verzichten, bionisches Vorgehen wird in diesem Szenario aber auch in näherer Zukunft systembedingt ein relativ mühsames Unterfangen bleiben.

Probleme und Szenarien wie die beiden obigen lassen sich mannigfaltig konstruieren und diskutieren. Um die letztlich dahinter stehende Frage ob und wie sich eine bionische Lösungssuche in der Technik realisieren lässt zu beantworten, wurde vom Autor eine Fallstudie auf Basis von insgesamt sieben Studienarbeiten initiiert. Wie bereits weiter vorne erwähnt, gibt es zwei prinzipielle bionische Vorgehensweisen. Derzeit am vergleichsweise etabliertesten ist in der Natur mehr oder weniger wahllos nach Phänomenen zu suchen, die sich zu technischen Produkten umsetzen lassen. Beispiel für Ergebnisse eines solchen Vorgehens ist der Lotuseffekt, die Struktur der Haifischhaut und einige mehr. Ein entgegengesetztes Vorgehen, nämlich ausgehend von einer technischen Problemstellung nach

biologischen Vorbildern zu suchen, scheint allerdings für die Industrie interessanter zu sein. Gerade für dieses Vorgehen sind aber nur vergleichsweise wenige Beispiele bekannt¹. Beide Vorgehensweisen wurden in den Fallstudien untersucht. Technische Aufgabenstellungen waren:

- einen flexiblen Werkzeugschaft für roboterunterstützte minimalinvasive Operationen zu konzipieren (AMMER 2002; PECQUET 2003),
- einen Staubsauger mit besserem Wirkungsgrad zu entwickeln (FRITSCH 2002, siehe auch Kapitel 6.1.2) sowie
- ein Konzept für die Rückkopplung thermischer Energie für Großküchen zu suchen (GAULL 2003).

Biologische Vorbilder, die technisch umgesetzt werden sollten waren:

- Das Prinzip der thermischen Zonung wie es Wasservögel für ihre unteren Extremitäten realisiert haben (NOPPER 2003),
- Bewegung in Flüssigkeiten mittels Geißeln (BAUER 2003), sowie
- Kraft- und Wegerzeugung mittels Osmose (MÖBNANG 2003).

Eine inhaltliche Beschreibung der im weiteren Verlauf nicht weiter erläuterten Arbeiten findet sich im Anhang.

In der Fallstudie zeigte sich, dass bei beiden Gruppen u.U. ein deutlicher Aufwand betrieben werden muss. Bei der ersten Gruppe, die sich mit technischen Aufgabenstellungen konfrontiert sah, war erwartungsgemäß ein erhöhter Aufwand in der Informationsbeschaffung zu erkennen. Teilweise mussten technisch relevante Informationen auch durch orientierende Versuche und ähnliches erst gewonnen werden. Derartige Aufwand war durch ein systematisches Vorgehen besser beherrschbar als zunächst erwartet. Das in den Fallstudien etablierte Vorgehen ist in Kapitel 6.1.1 detaillierter dargestellt. Das Auffinden von potenziellen Analogien gestaltete sich außer bei dem Thema mit der Energierückkopplung relativ unkritisch. Es muss an dieser Stelle aber auch darauf hingewiesen werden, dass in den Fallstudien immer Personen mit einem relativ soliden und breit angelegten Grundwissen seitens der Biologie beteiligt waren. Man muss dazu keineswegs Biologie studieren – das Informationsangebot in den Medien und in populärwissenschaftlicher Literatur ist mit dem in der Schule angelegten Grundstock an Fachwissen dafür durchaus ausreichend. Wer sich zeitlebens allerdings nie für Biologie interessiert hat, wird sich hier sicherlich dementsprechend schwer tun. Gerade wenn keine Personen mit einer ausreichenden Vorbildung

¹ Sehr beeindruckend ist die Beschreibung der Erfindung eines Streuers für Haushalt und medizinische Zwecke von FRANCE (1920). Technische Problemstellung war, Streugut homogen auf einer Fläche zu verteilen. Diese Zielsetzung gilt auch für die Samenbehälter der Mohnpflanze, France leitete aus dieser Vorlage ein technisches Konzept ab.

verfügbar sind, werden Werkzeuge interessant, mit deren Hilfe sich vielversprechende Analogsysteme auffinden lassen (siehe Kapitel 6.2).

Bei der zweiten Gruppe, die technische Anwendungen für bekannte Phänomene aus der Biologie suchen und entwickeln sollten, entfielen die oben beschriebenen Probleme bei der Informationsbeschaffung. Alle verwendeten Phänomene sind seit mehr als hundert Jahren bekannt und dementsprechend genau erforscht. Im Fall der thermischen Zonung war es relativ aufwändig, eine realistische Anwendung zu finden. Thermische Zonung bei Wasservögeln ist ein Konzept Wärmespeicherung durchströmter Systeme ohne Isolation zu ermöglichen: Die unteren Extremitäten von Wasservögeln haben trotz konstant hoher Körperkerntemperatur in etwa die Temperatur des umgebenden Mediums, sofern diese nicht unter dem Gefrierpunkt liegt. Dennoch verlieren Wasservögel über ihre gänzlich unisolierten Extremitäten kaum Wärme: Zwischen Körper und Extremität befindet sich eine Art Wärmetauscher, in dem das arterielle Blut seine Wärme an das venöse Blut überträgt. Die Suche nach potenziellen technischen Anwendungsfällen wurde u.a. mittels Schlagwortsuchen im Internet durchgeführt. Da sich hier aber nur sehr allgemeingebäuchliche Begriffe zur Beschreibung anbieten, war man mit einem Informationsüberangebot konfrontiert, das kaum zu handhaben war. Eine Software, die die Suche nach semantischen Zusammenhängen ermöglichen sollte, wies leider nicht die versprochene Funktionalität auf¹. Werkzeuge, die eine Stichwortsuche um eine Suche nach logischen Zusammenhängen erweitern, wären in vergleichbaren Fällen sicherlich sehr hilfreich.

Die Fallstudie zeigt unabhängig der skizzierten aber bewältigbaren Schwierigkeiten, dass trotz historisch stark unterschiedlich gewachsener Randbedingungen natürliche Vorlagen und daraus ableitbare technische Anwendungen keineswegs so unvereinbar sind, wie es zunächst scheinen mag. Wer nicht den zweifelhaften Ergeiz hat, den Jahrmillionen großen Vorsprung der belebten Natur in einer technischen Umsetzung einholen zu wollen, sich also mit einer Anregung durch natürliche Systeme und nicht erst mit ihrer Kopie zufrieden stellt, kann sehr erfolgreich sein. Die oben aufgeführten Studienarbeiten dokumentieren dies.

¹ Näheres dazu in NOPPER, 2003.

4.6 Überblick und Schlussfolgerungen

Die Durchmusterung von Methoden zur Anregung der Kreativität bei der Lösung technischer Probleme ergibt vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnisse ein relativ heterogenes und teilweise auch defizitäres Bild. Die Kritikpunkte im Einzelnen:

Synthese und Analyse sind gerade auf elementaren Ebenen untrennbar miteinander verknüpft. Die Konstruktionsmethodik aus dem deutschsprachigen Raum wird dieser Tatsache bestenfalls in Ansätzen gerecht. Trotz des teilweise deutlich präskriptiven Charakters entsprechender Methoden, mit denen man auch bei der funktionalen Analyse eines vorliegenden Problems den Konstrukteur „an die Hand nimmt“, überlässt man ihn gerade im kritischsten Moment, nämlich bei dem Übergang zur Entwicklung von Lösungsansätzen sich selbst. FRANKE (1999, S. 16) benennt diesen Mangel, wenn auch in einem etwas anderen Kontext. Gerade die Beobachtung, dass man nach dem Aufbau einer klassischen umsatzorientierten Funktionsstruktur gern in ein konstruktionsmethodisch schwarzes Loch fällt, wird von bedenklich vielen eher unerfahrenen Methodenanwendern, die sich nicht selbstverständlich weiterführender Schritte widmen, geteilt.

Die Problemanalyse und damit letztlich die Problemmodellierung wird durch unterschiedliche Typen von Funktionsstrukturen unterstützt. Diese Typen bieten meist eine spezifische Blickrichtung auf die Problemstellung, sind alleinstehend also nur selten ausreichend (FRANKE 1999, S.15ff). Technische Problemstellungen sind meist physikalischer Natur. Die bekannten Funktionsstrukturen ermöglichen in unterschiedlicher Ausprägung eine qualitative physikalische Betrachtung. Eine quantitative Betrachtung auch über die Methoden der Funktionsanalyse hinaus scheint in der Konstruktionsmethodik verpönt zu sein. Welche Rolle quantitative Analysen auch hinsichtlich einer kreativen Lösungssuche haben können, soll in Kapitel 5 besprochen werden.

Die als dialektisch charakterisierten Methoden, die eine stärkere Verknüpfung von Problemmodellierung und Entwicklung von Lösungsansätzen bieten, haben sich vergleichsweise wenig etabliert. Sieht man von einigen sicherlich etwas gewöhnungsbedürftigen Ansätzen ab, deuten diese Methoden zumindest auf ein hohes Potenzial hin. Durchaus provozierend sei der Konstruktionsforschung unterstellt, dass man diese Methoden weniger wegen ihrer Qualität vernachlässigt hat, als vielmehr wegen der mangelnden Übereinstimmung mit stringenten Modellen des Produktentwicklungsprozesses, die Problemmodellierung und Lösungsentwicklung zeitlich trennen. Immerhin zeichnet sich der notwendige Paradigmenwechsel vor allem die Vorgehensmodelle betreffend bereits ab.

Kreativitätstechniken haben auch in industriellem Umfeld eine vergleichsweise starke Verbreitung gefunden. Der Vertreter dieser Methoden schlechthin ist das Brainstorming. Unverständlich ist, dass die vor fast fünfzig Jahren durch Psychologen nachgewiesene Unwirksamkeit dieser Methode, deren Mängel in der Zwischenzeit detailliert erforscht

wurden, der Begeisterung in der Konstruktionsforschung für das Brainstorming praktisch keinen Abbruch tut. Bestehende Varianten des Brainstormings und vor allem andere Kreativitätstechniken, die deutlich erfolgversprechender sind, finden vergleichsweise wenig Verbreitung. Auch die Kombination von Elementen des Brainstormings mit anderen Methoden (-bausteinen) ist denkbar¹. Ähnlich wie bei den dialektischen Methoden lässt sich hier Handlungsbedarf identifizieren.

Externe Information integrierende Methoden bieten zweifelsohne ein hohes Potenzial zum Finden innovativer Lösungen. Die Qualität von Sammlungen derartiger Informationen hängt neben der Situation in der sie angewendet werden ganz entscheidend vom Abstraktionsgrad ihrer Darstellung ab. Sind Informationen zu konkret, führen sie zu Fixierungen, sind sie zu abstrakt, kann der Informationsgehalt zu gering sein. In letzterem Fall wirken Informationssammlungen primär durch weitläufige Assoziationen, aktivieren folglich hauptsächlich „interne Information“, also Wissen. Wo der ideale Abstraktionsgrad für die Darstellung liegt, kann heute nicht beantwortet werden, ebensowenig wie die Frage, ob ein solcher Idealpunkt situationsunabhängig überhaupt existiert.

Eine zwar populäre, aber wenig zur Anwendung kommende Methode zur Integration externer Information ist die Bionik. Strenggenommen ist sie wohl eine der ältesten Methoden überhaupt. Heute wird Bionik im Wesentlichen in der Form betrieben, dass für Entdeckungen in der Biologie technische Anwendungen gesucht werden. Ein entgegengesetztes Vorgehen, nämlich aus einer technischen Problemstellung heraus Lösungen anhand biologischer Vorbilder zu suchen, ist sehr selten. Gerade dieses Vorgehen dürfte für die Industrie von Interesse sein, wird aber methodisch nur sehr rudimentär unterstützt. Mängel bestehen hier hinsichtlich eines geeigneten Vorgehensmodells, sowie einfacher Hilfsmittel zum Auffinden potenzieller Analogsysteme. Ansätze hierfür sollen in Kapitel 6 beschrieben werden.

¹ Ob man in einem solchen Fall von einer Weiterentwicklung des Brainstormings spricht, oder analog dazu von der Weiterentwicklung / Anpassung der damit kombinierten Methode, erscheint hier wenig zielführend.

5 Physikalische Problemmodelle

In Kapitel 5 sollen die in der Entwicklungsmethodik etablierten Problemmodelle um eine physikalische Modellbildung erweitert werden. Vor dem Hintergrund kognitionspsychologischer Erkenntnisse zeigte sich im vorangegangenen Kapitel, dass die Wichtigkeit von Problemmodellen seitens der Entwicklungsmethodik bislang noch unterschätzt wird. Bestehende Methoden liefern sicherlich einen Beitrag zur Problemmodellierung, erscheinen aber bei weitem nicht ausreichend. Die im Folgenden beschriebene Modellierung gründet auf Beobachtungen und positiven Erfahrungen in zahlreichen Entwicklungsprojekten.

Technische Systeme weisen häufig eine derartige Komplexität auf, dass die zu ihrer Entwicklung zu lösenden Probleme in der Regel ebenfalls komplex sind. Der Mensch mit seinen eingeschränkten geistigen Fähigkeiten¹ trifft hier auf Schwierigkeiten, die im weitesten Sinne zu Fehlern führen. So sind nach DÖRNER (2001, S. 58ff) Ursachen für Fehler unter anderem die durch Komplexität bedingte Intransparenz eines Problems, die zu der Bildung falscher Hypothesen führt. MICHALEWICZ² ET AL. (2002, S. 15) formuliert in diesem Zusammenhang treffend: Every time we solve a problem we must realize that we are in reality only finding a solution to a *model* of the problem. All models are a simplification of the real world, ...“. Die Qualität einer Lösung hängt folglich stark von der Qualität des gebildeten Modells ab. Für den kognitiven Prozess der Problemlösung muss das Problemmodell geeignet sein, einen (vorweggenommenen) Lösungsansatz intern zu evaluieren (die kognitiven Zusammenhänge werden in Kapitel 3.4 tiefer besprochen).

Entgegen des durch die o.g. Quellen möglicherweise entstehenden Eindrucks, sind diese Erkenntnisse alles andere als neu. Gerade das Systems Engineering betont die Wichtigkeit der Modellbildung bevorzugt zur Handhabung von Komplexität. KALETKA (1999, S. 10 ff) fordert dementsprechend den Einsatz ganzheitlicher Modelle, die es dem Entwickler erlauben, schon sehr früh Lösungen von Nicht-Lösungen zu unterscheiden, um so eine effizientere Lösungssuche zu ermöglichen. Im Systems Engineering werden Systemmodelle in

- umgebungsorientierte (Kunde, Wettbewerber, Gesetze, Umwelt, ...),
- wirkungsorientierte (Input/Output) und
- strukturorientierte (Wechselwirkungen zwischen Elementen, Abläufe)

¹ Das in konstruktionsmethodischen Büchern breitgetretene Modell des Kurzzeitgedächtnisses mit einer Kapazität von ca. sieben chunks ist dabei nicht das entscheidende Limit. Ein differenzierterer Blick auf unsere geistigen Fähigkeiten bietet Kapitel 3.

² Die angegebene Quelle behandelt die Lösung mathematischer Probleme.

Modelle unterteilt. Zur ihrer Darstellung werden Graphen¹ und Matrizen empfohlen (DAENZER 2002, S. 9ff).

Die o.g. Modelle werden in ihrer Summe weitestgehend als „ganzheitlich“ bezeichnet. Aber ist das für die Praxis wirklich zutreffend? Die Entwicklungsmethodik fordert die Berücksichtigung aller im Zuge des Produktlebenszyklusses auftretenden Gesichtspunkte bei der Entwicklung. Als Beispiel können hier die Herstellungskosten eines Teils, die Haptik eines Bedienelements oder die Fraktionierbarkeit der Werkstoffe für das Recycling gelten. Alle diese Punkte ändert der Entwickler aber nicht unmittelbar. Bezogen auf die Beispiele wird er zur Reduktion der Herstellungskosten nach Überprüfung der auftretenden *Belastungen* vielleicht ein anderes Material verwenden. Für die Haptik eines Bedienelements wird er für eine *Dämpfung* mittels eines Elastomers mit Hystereseigenschaften sorgen. Zur Verbesserung der Fraktionierbarkeit nach einer *Bauraumbetrachtung* von Schraubenverbindungen auf Schnappverbindungen übergehen. Das Niveau, auf dem der Bearbeiter bei der Entwicklung materieller Produkte² folglich früher oder später arbeitet, wird immer das der Physik sein. Praktisch jede Änderung, die an einem technischen System vorgenommen wird, wird sich „physikalisch“ äußern und darf für den Erfolg nicht die physikalischen Randbedingungen verletzen. Obwohl die Ingenieurwissenschaften allgemein als Betreiber angewandter Physik³ bezeichnet werden, wird im Systems Engineering die daher naheliegende physikalische Modellbildung⁴ praktisch nicht erwähnt. Dieses Defizit teilt sich das Systems Engineering mit dem überwiegenden Teil der Konstruktionsmethodik. Hier werden physikalische Modelle bestenfalls zur Bewertung von Lösungsalternativen empfohlen. Einzig die aus der ehemaligen UdSSR stammende Methodik TRIZ weist in ihrer algorithmischen Fassung (ARIZ)⁵ eine deutlichere physikalische Orientierung bereits in Phasen der Problemlklärung und Zielformulierung auf. Die durch den amerikanischen Raum beeinflusste Weiterentwicklung dieser Methode (TIPS) hat diese physikalische Orientierung allerdings sehr stark abgeschwächt.

¹ Der Begriff „Graph“ ist hier nicht im mathematischen Sinne zu verstehen, sondern als Netzwerk von Systemelementen, das auch als „Bubble Chart“ bezeichnet wird. Die in der Konstruktionsmethodik bekannten Funktionsstrukturen zählen als Darstellungen ebenfalls zu derartigen Graphen.

² Für die Softwareentwicklung oder der Konzeption von Dienstleistungen dürfte die Physik eine untergeordnete Rolle spielen.

³ Physik im weitesten Sinne: Z.B. im Anlagenbau sind auch Aspekte der Chemie zu berücksichtigen.

⁴ Unter physikalischen Modellen sind solche zu verstehen, die sich mathematisch ausdrücken lassen. Umgangssprachlich handelt es sich also um durch „Formeln“ ausdrückbare Zusammenhänge.

⁵ in ARIZ werden einzelne in TRIZ beschriebene Methoden in einem geschlossenen Ablaufplan („Algorithmus“) kombiniert. Das Vorgehen für die Problemanalyse und Lösungssuche bis zur Konzeptreife ist in dieser Form vorgegeben.

In den nachfolgenden Kapiteln soll aufgezeigt werden, welche Rolle eine physikalisch orientierte Problemmodellierung für die spätere Lösungssuche spielen kann. Es soll des Weiteren herausgearbeitet werden, wann und in welcher Form eine solche Modellierung bevorzugt stattfinden kann.

5.1 Hypothesen

Dass die Effizienz der Lösungssuche sehr stark von der Qualität der Problemklärung abhängen kann, ist unbestritten. Die weiterführende Behauptung, dass gerade der Aufbau physikalischer Problemmodelle die Effizienz der nachfolgenden Lösungssuche sehr stark unterstützen kann, lässt sich mittels folgender Hypothesen präzisieren:

1. Die Darstellung der physikalischen Wechselwirkungen innerhalb einer Problemstellung führt zu einer sehr guten Basis für die Ableitung technischer Entwicklungsziele. Sie bietet in Verbindung mit einer (physikalischen) Betrachtung der Freiheitsgrade eine sehr starke Fokussierung innerhalb des Entwicklungsprozesses, die zu einer deutlichen Effizienzsteigerung führen dürfte.
2. Die Erweiterung qualitativer physikalischer Problemmodelle um quantitative Zusammenhänge verstärkt den in Hypothese 1 skizzierten Effekt für die Lösungssuche noch deutlich. „Quantitative Zusammenhänge“ beziehen sich dabei weniger auf die reine Beschreibung eines bestimmten Zustandes, als vielmehr auf das Systemverhalten. Unter Systemverhalten wird die qualitative und quantitative Reaktion des Systems auf eine Änderung (entspricht Lösungsansatz) verstanden.
3. Qualitative und quantitative physikalische Betrachtungen stehen mit ihrer Fokussierung des Prozesses der Lösungssuche nicht im Widerspruch zu kreativen Problemlösungen, sie ermöglichen ganz im Gegenteil sehr innovative und starke Lösungen.
4. Häufig werden unkonventionelle Lösungsansätze bereits sehr früh verworfen, weil sie zumindest intuitiv als „unrealistisch“ eingeschätzt werden. Ein solides physikalisches Problemmodell bietet über die sehr fehlerträchtige intuitive Einschätzung hinaus eine gute Basis, Lösungsansätze in frühen Phasen zu bewerten.

Die oben stehenden Hypothesen wurden basierend auf in mehreren Industrieprojekten gemachten Beobachtungen gebildet und bestätigt. Die nachfolgenden Fallbeispiele sollen zur Validierung der Thesen beitragen.

5.2 Fallbeispiele

Neben der Validierung der in Kapitel 5.1 aufgeführten Hypothesen soll durch die Fallbeispiele auch transparent werden, wie situativ vielgestaltig physikalische Problemmodelle ausfallen können, und wie man mit ihnen arbeiten kann.

5.2.1 Konzept für eine Fahrzeugtür in Leichtbauweise

Innerhalb eines Industrieprojektes galt es, Kosten für ein Türenkonzept, das bei Schienenfahrzeugen eingesetzt wird, deutlich zu reduzieren. Das bestehende Konzept war aufgrund der hohen Anforderungen hinsichtlich Masse (niedrig) und Steifigkeit (hoch) eine Sandwichkonstruktion aus Aluminium. Dazu wurden an die Fahrzeugwölbung durch Biegen angepasste Stangpressprofile nach einer spanenden Bearbeitung an den Ecken der Tür durch Schweißen zu einem Rahmen gefügt. Aufgrund des Wärmeeintrags beim Schweißen musste dieser Rahmen in einem weiteren Fertigungsschritt gerichtet werden. Der Türrahmen wurde anschließend mit einem zweiten, ähnlich gestalteten Rahmen für das in der Tür befindliche Fenster und einer Aluminiumwabe zur Versteifung zwischen zwei Aluminiumblechen verklebt (vgl. Abbildung 5-1). Die Aluminiumbleche als sichtbare Flächen der Tür wurden anschließend in Fahrzeugfarbe lackiert. Die Aluminiumprofile für den Türrahmen wiesen wegen der vielfältigen Fahrzeugtypen und der unterschiedlichen Befestigungen am Fahrzeugumpf einen Variantenreichtum auf, der die Kosten zusammen mit den aufwändigen Fertigungsverfahren in inakzeptable Höhen trieb.

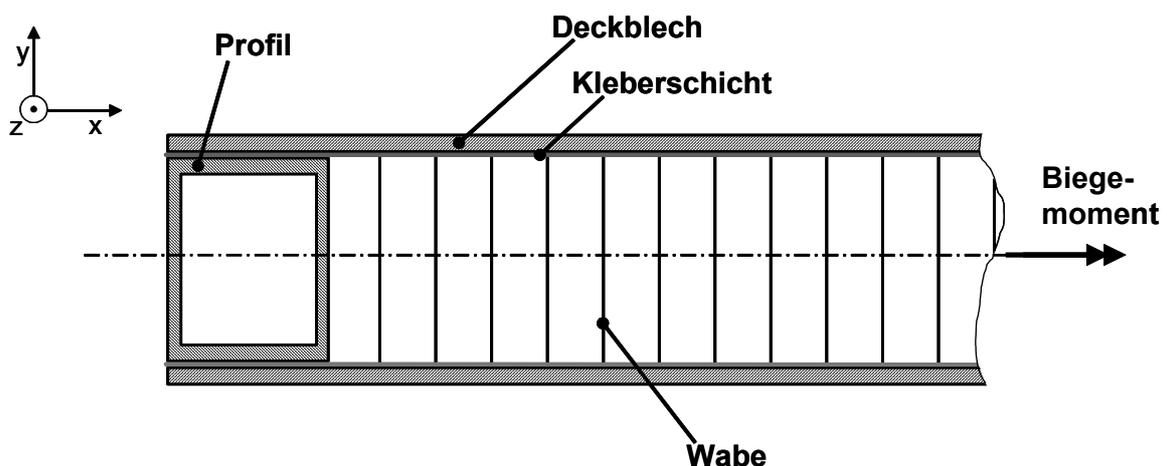
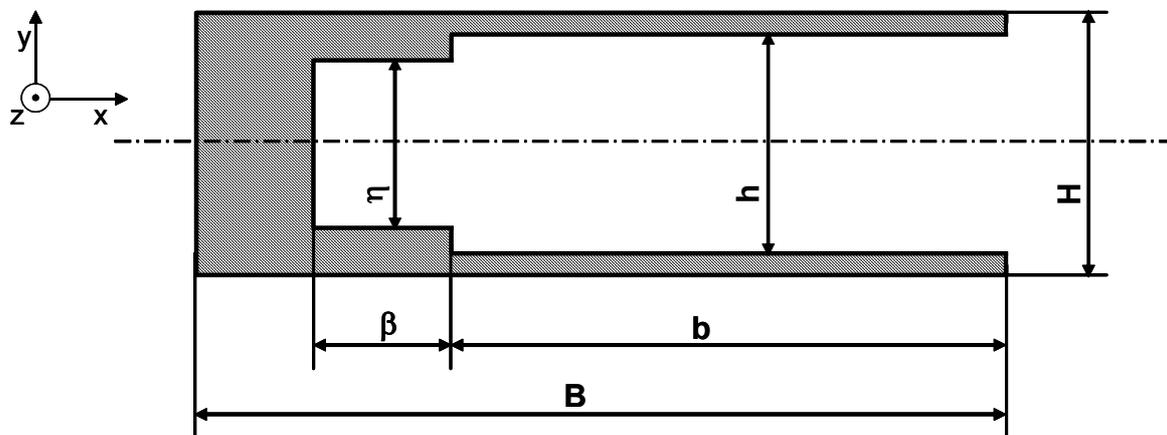


Abbildung 5-1: Türquerschnitt.

Man hatte sich auch bereits in der Vergangenheit um das Heben von Einsparungspotenzialen bemüht, ein deutlicher Durchbruch war bislang aber noch nicht gelungen. Innerhalb

eines ganztägigen, interdisziplinär besetzten Workshops war es nun Aufgabe, die Vielfalt an Profilvarianten deutlich zu reduzieren. Im Vorfeld des Workshops wurde eine physikalische Analyse des Systemverhaltens hinsichtlich der Umverteilung des Materials durchgeführt. Hilfsmittel dazu war ein Programm zur Tabellenkalkulation. Auf Basis eines vereinfachten mechanischen Modells (vgl. Abbildung 5-2) wurden die in Abbildung 5-3. dargestellten Optimierungsstrategien hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Biegesteifigkeit und die Masse der Konstruktion analysiert und in Relation gesetzt. Bis dato waren zur Erhöhung der Steifigkeit vor allem die Profile verstärkt worden, was neben hohen Materialkosten auch mitverantwortlich für die Variantenvielfalt war. Die Berechnungsergebnisse zeigten sehr deutlich, dass diese Strategie sowohl hinsichtlich der Steifigkeit als auch der Masse wenig zielführend war.



$$I_x = \frac{BH^3 - bh^3 - \beta\eta^3}{12}$$

Abbildung 5-2: Vereinfachtes physikalisches Modell.

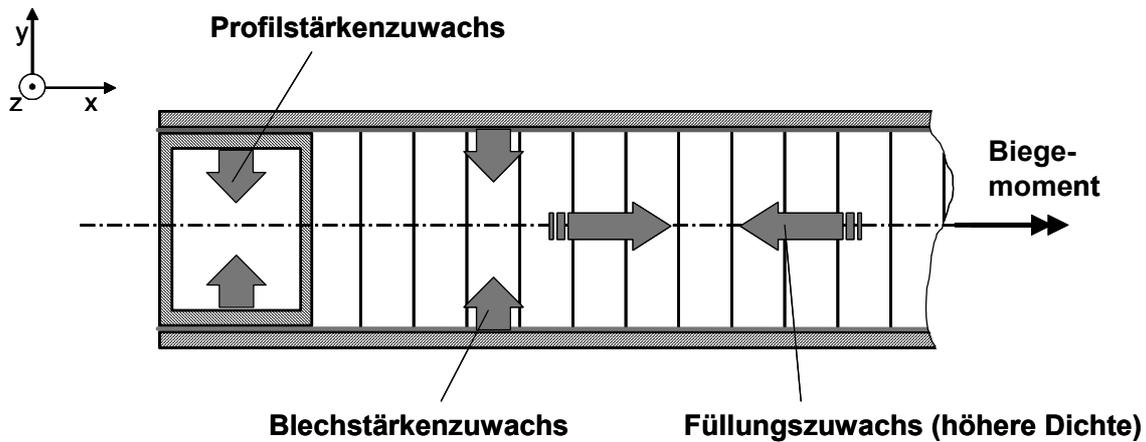


Abbildung 5-3: Optimierungsstrategien (Materialzuwächse durch graue Blockpfeile gekennzeichnet).

Auf Basis des analysierten Systemverhaltens entstand zunächst der Vorschlag, ein im Vergleich zu bestehenden Profilen dünnwandigeres Standardprofil zu definieren und dieses zwischen Bleche mit höherer Wandstärke einzukleben. Ein deutlich radikalerer Ansatz war, auf die Profile vollständig zu verzichten und statt dessen die Türinnenseite als Tiefziehteil zu gestalten. Wegen der nicht allzu hohen Stückzahlen bot sich dazu ein Hydroformverfahren mit für den Prototypenbau gedachten Tiefziehformen mit eingeschränkter Lebensdauer an. Die tiefgezogene Türhälfte sollte in diesem Konzept mit einem ebenen Blech verklebt werden. Der Innenraum hätte entweder konventionell mit einer Aluminiumwabe stabilisiert werden, oder einfach ausgeschäumt werden können. Sämtliche Teilnehmer des Workshops werteten die erarbeiteten Lösungsansätze als großen Schritt.

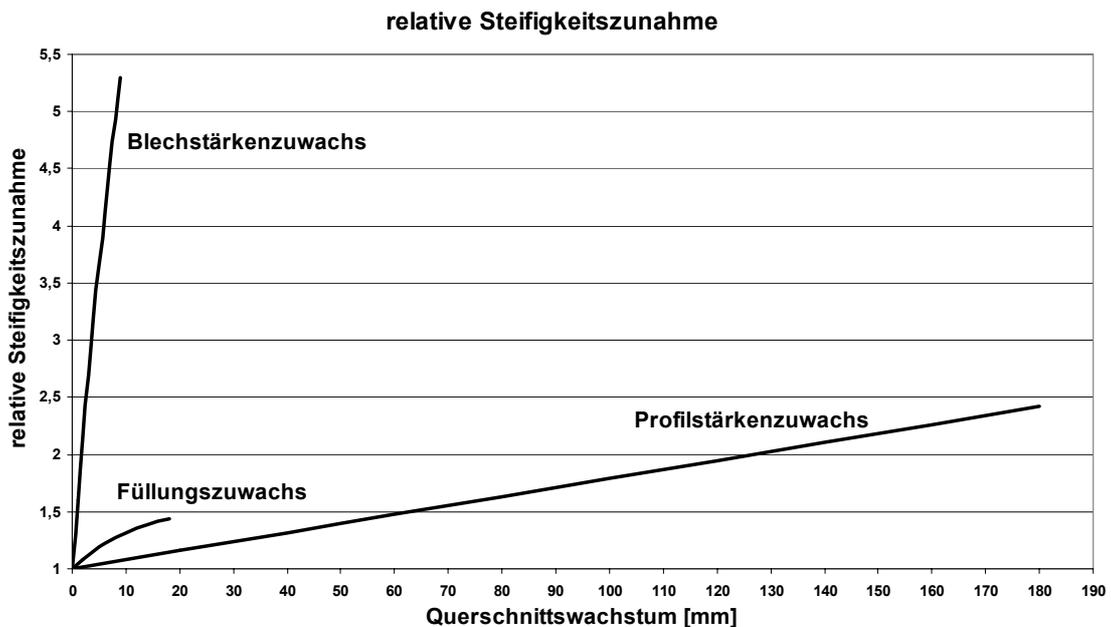


Abbildung 5-4: Relative Steifigkeitszunahme bei Anwendung der o.g. Optimierungsstrategien.

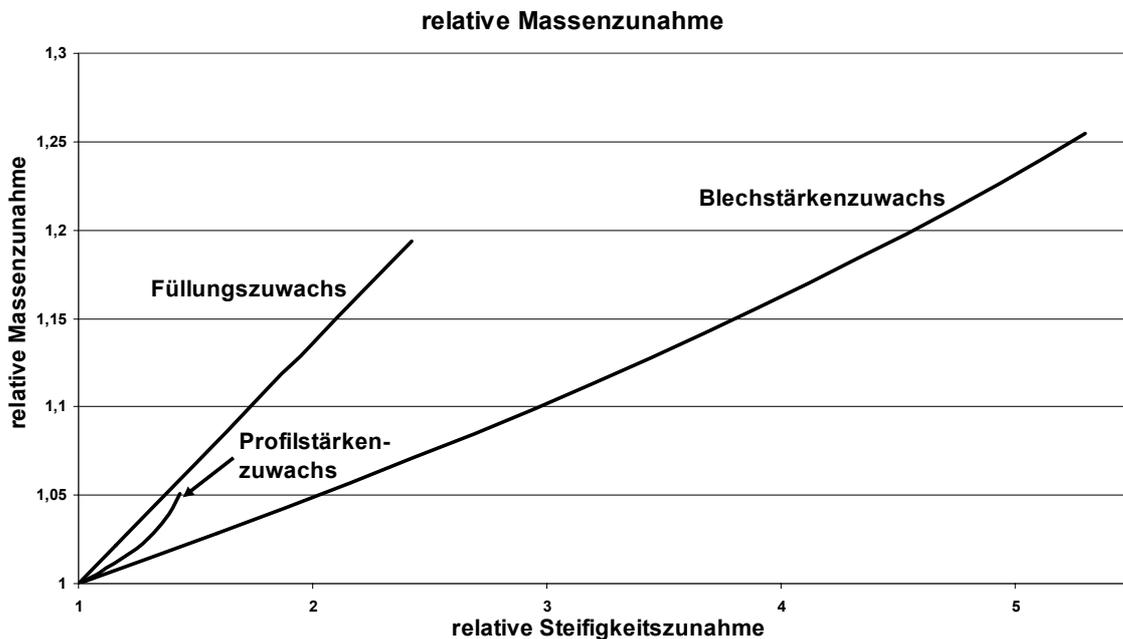


Abbildung 5-5: Relative Massezunahme bei Anwendung der o.g. Optimierungsstrategien.

Wie bereits in Kapitel 4.5.1 besprochen, ermöglicht eine derartige Einzelfallstudie keine belastbare Aussage darüber, wie der Prozess ohne die physikalische Systemmodellierung verlaufen wäre. Dass die Modellierungsstrategie in diesem Fall zumindest sehr wahrscheinlich für den Durchbruch in der Lösungssuche führte, lässt sich anhand der folgenden Punkte erhärten:

Den qualitativen Zusammenhang, dass die Biegesteifigkeit eines Querschnitts mit der Entfernung zur Biegeachse zunimmt, kennt man: Wenn in anderen Worten nicht bereits seit der Kindheit, spätestens nach dem ersten Semester Maschinenbaustudium. Man kann also mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass allen Beteiligten dieser Zusammenhang bekannt war. Türen waren aber bis zu dem o.g. Workshop ausschließlich dadurch verstärkt worden, dass steifere Profile verwendet wurden. Die Blechstärke blieb trotz ausgiebiger FEM-Berechnungen¹ stets unangetastet. Es ist also sehr naheliegend, dass den Beteiligten zunächst nicht bewusst war, wie das System auf Querschnittsänderungen der einzelnen Bestandteile quantitativ und in Relation hinsichtlich Biegesteifigkeit und Masse reagieren würde. Nur durch die quantitative Analyse wurde letztlich eine Variation der Funktionserfüllung durch die einzelnen Bauteile ermöglicht: Hätte man im Vorfeld auf die

¹ FEM-Berechnungen bilden zunächst immer nur den Zustand eines Systems ab, nicht sein Verhalten auf Änderungen. Für die Nachrechnung von Bauteilen ist das sicherlich in Ordnung. Für die Entwicklung sind weniger hochexakte Ergebnisse relevant als vielmehr Tendenzen, die dem Entwickler aufzeigen, „in welche Richtung“ er sich bewegen muss. FEM-Berechnungen erfüllen genau diese Anforderung meist nicht.

Analyse verzichtet, wären die oben beschriebenen Lösungsansätze u.U. nicht geäußert worden, im Zweifelsfall aber sehr wahrscheinlich sofort mit dem intuitiven (und falschen) Argument eines unzulässigen Massezuwachses oder zu geringer Steifigkeit noch während des Workshops verworfen worden.

5.2.2 Konzept für ein Antriebssystem im Anlagenbau

Das Antriebssystem, dessen Weiterentwicklung hier beschrieben werden soll, dient zum Beschleunigen und Drehen größerer Wellen im Anlagenbau¹. Bei Wellen bis zu einer bestimmten Größe kommen elektromechanische Antriebssysteme zum Einsatz, bei denen ein Elektromotor über ein zuschaltbares Getriebe die Welle antreibt. Beschleunigt man eine derartige Welle aus dem Stand, muss meist ein sog. Losbrechmoment überwunden werden. Dieses Moment rührt daher, dass aus Kostengründen meist hydrodynamische Gleitlager zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund muss zunächst die hohe Haftreibung zwischen Welle und Lager (St-St-Kontakt) überwunden werden, bis sich ein Schmierfilm ausgebildet hat, sodass nur noch Flüssigkeitsreibung besteht.

Der Aufbau eines solchen Antriebssystems ist bewundernswert einfach: Motor (Asynchronmotor) und Getriebe werden so dimensioniert, dass das Kippmoment des Motors an das Losbrechmoment angepasst ist, die Nenndrehzahl des Antriebs der zu erreichenden Drehzahl der Welle entspricht. Ist der Antrieb gut an den Anwendungsfall angepasst, kann auf eine Drehzahlregelung und ähnliches verzichtet werden – man muss den Antrieb einfach nur einschalten.

Heute geht der Trend einerseits zu Anlagen mit größeren Wellen, andererseits zu höheren Drehzahlen. Beide Effekte machen die Verwendung größerer Motoren notwendig. Handelsübliche E-Motoren unterliegen den üblichen Stufensprüngen. Bei zunehmender Leistung sind diese zu grob, um die quantitativen Anforderungen mittels des ursprünglichen sehr einfachen Konzepts zu erreichen. Neben den rein funktionalen Gesichtspunkten sind die Motoren besonders teure Zukaufteile, je kleiner diese also dimensioniert werden können, desto besser.

Aus den o.g. Gründen sollte ein neues Konzept gefunden werden. Als konzeptrelevante Größen wurden das Antriebsmoment, die Drehzahl und die Antriebsleistung identifiziert. Eine quantitative Betrachtung der einzelnen Größen zeigte die teilweise deutlich unterschiedlichen Anforderungen an den Motor je nach Einsatzfall. Für Wellen, die mit niedrigen Drehzahlen betrieben werden, ist durch das vergleichsweise sehr hohe Losbrechmo-

¹ Antriebssystem und Einsatzzweck sind aus Gründen einer Geheimhaltungserklärung gegenüber dem Projektpartner in der Industrie nebulös dargestellt. Für die Aussagekraft des Fallbeispiels ist dies allerdings irrelevant.

ment vor allem ein hohes Kippmoment des Motors bei zu vernachlässigenden Drehzahlen entscheidend. Dies führt häufig dazu, dass der Motor nach Überwinden des Losbrechmoments völlig überdimensioniert ist. Bei zunehmend höheren Drehzahlen verliert das Kippmoment des Motors an Relevanz. Aufgrund der hohen Drehzahlen ist in den letzten Phasen der Beschleunigung aber auch während des Betriebs der Anlage eine sehr hohe Motorleistung notwendig (Reibungsverluste). Motoren, die eine derartig hohe Leistung zur Verfügung stellen, haben in der Regel auch ein so großes Kippmoment, dass die Problematik des Losbrechens in den Hintergrund tritt. Die physikalische Analyse des Antriebs basierend auf dem für die Welle notwendigen Arbeitsverhalten legte also eine Fallunterscheidung nahe:

Fall 1: Losbrechmoment entscheidend und

Fall 2: Leistungsbedarf entscheidend.

Wie bereits oben erwähnt, ist in Fall 1 der Motor nach dem Losbrechen prinzipiell überdimensioniert. Kosten könnte man also sparen, würde man mit einem kleineren Antrieb auskommen (Zielformulierung). Um sich das vorliegende Systemverhalten besser vorstellen zu können, wurde die rotatorische Bewegung in eine translatorische übersetzt. Die Beschleunigung der Welle aus dem Stillstand ähnelte in ihrem Verhalten also einem mit einem Fahrzeug zu überwindenden Berg mit anfänglich sehr steiler Steigung, die kurz darauf deutlich abnimmt (vgl. Abbildung 5-6). Durch diese Analogie wurde das vorliegende Problem auf ein alltägliches zurückgeführt, für das man auch eine quantitative Vorstellung hat. Im vorliegenden Fall boten sich im Wesentlichen also zwei Strategien an: „Schwung holen“ vor dem steilen Stück oder „Zurückschalten“¹.

¹ Natürlich wäre auch eine Systemgrenzenerweiterung möglich. der Analogie entsprechend wäre das die Frage wie man den Berg weniger steil machen könnte, oder zurückübersetzt, wie man das Reibmoment verringern kann. Maßnahmen dazu schieden allerdings in diesem Projekt prinzipiell aus.

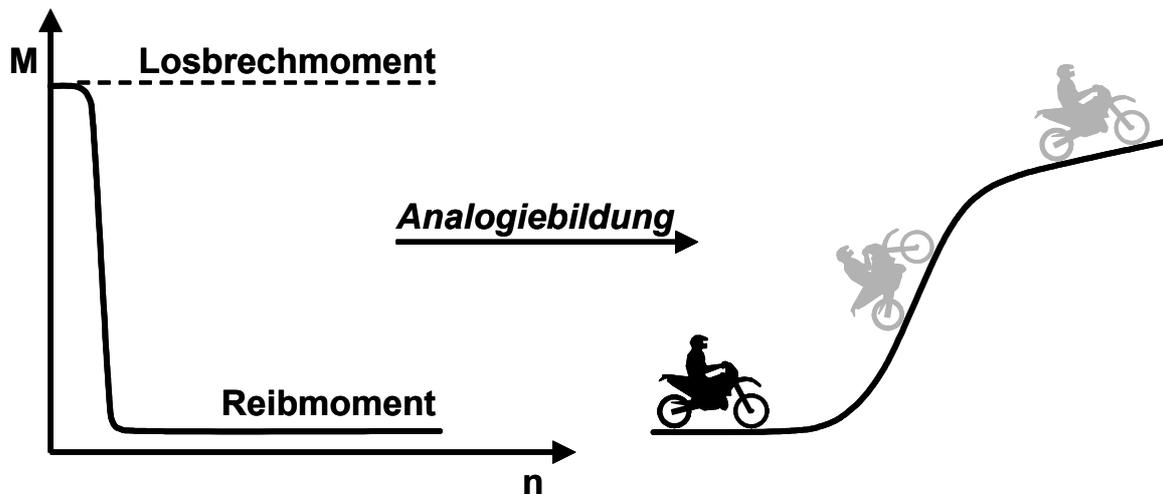


Abbildung 5-6: Momentenbedarf der Welle über der Drehzahl in Fall 1 (links) und gebildete Analogie (rechts).

Für die Strategie „Schwung holen“ wurde ein Konzept entwickelt, bei dem bei stehender Welle zunächst mit einem deutlich kleineren Motor ein Schwungrad beschleunigt wird, der bei Erreichen der Nenndrehzahl zusammen mit dem Motor durch eine Kupplung auf die Welle aufgeschaltet wird. Der so entstehende Ruck bricht die Welle los. Für die Strategie „Zurückschalten“ boten sich einfache Schaltgetriebe, stufenlose Getriebe, vor allem aber „elektrische Getriebe“ wie z.B. polumschaltbare Motoren und solche, die sich von Dreieck- auf Sternschaltung umschalten lassen an.

Der Fall 2 bot im Gegensatz zu Fall 1 deutlich geringeren Spielraum für umsetzbare Lösungen. Die Darstellung der Momenten- und Leistungsverläufe zeigte allerdings, dass bei der augenblicklichen Lösung ohne Drehzahlregelung hohe Leistungen aufgrund der annähernd konstanten Beschleunigung und damit Momenten erst im Bereich der hohen Drehzahlen notwendig sind (vgl. Abbildung 5-7). Die prinzipielle Lösung lag damit auf der Hand: Der Motor muss bei höheren Drehzahlen „gedrosselt“ werden. Eine Verringerung des Beschleunigungsmoments ermöglicht geringere Motorleistungen. Die Dimensionierung des Antriebs hinsichtlich eines Beschleunigungsverlaufs mit konstanter Antriebsleistung statt mit konstantem Antriebsmoment¹ führt zu deutlich kleineren Antrieben. Erreichbar ist dies z.B. durch käufliche Frequenzumrichter.

¹ Das Moment ist bei Asynchronmotoren streng genommen natürlich nicht konstant über der Drehzahl. Tatsächlich ist der Verlauf sogar noch ungünstiger: Das Moment nimmt bis ca. 90% der Nenndrehzahl um ca. 30% zu und bricht dann bei Nenndrehzahl relativ schlagartig zusammen. Damit ist der Vorteil einer Beschleunigung mit konstanter Leistung sogar noch größer als aus dem physikalischen Modell hervorgeht.

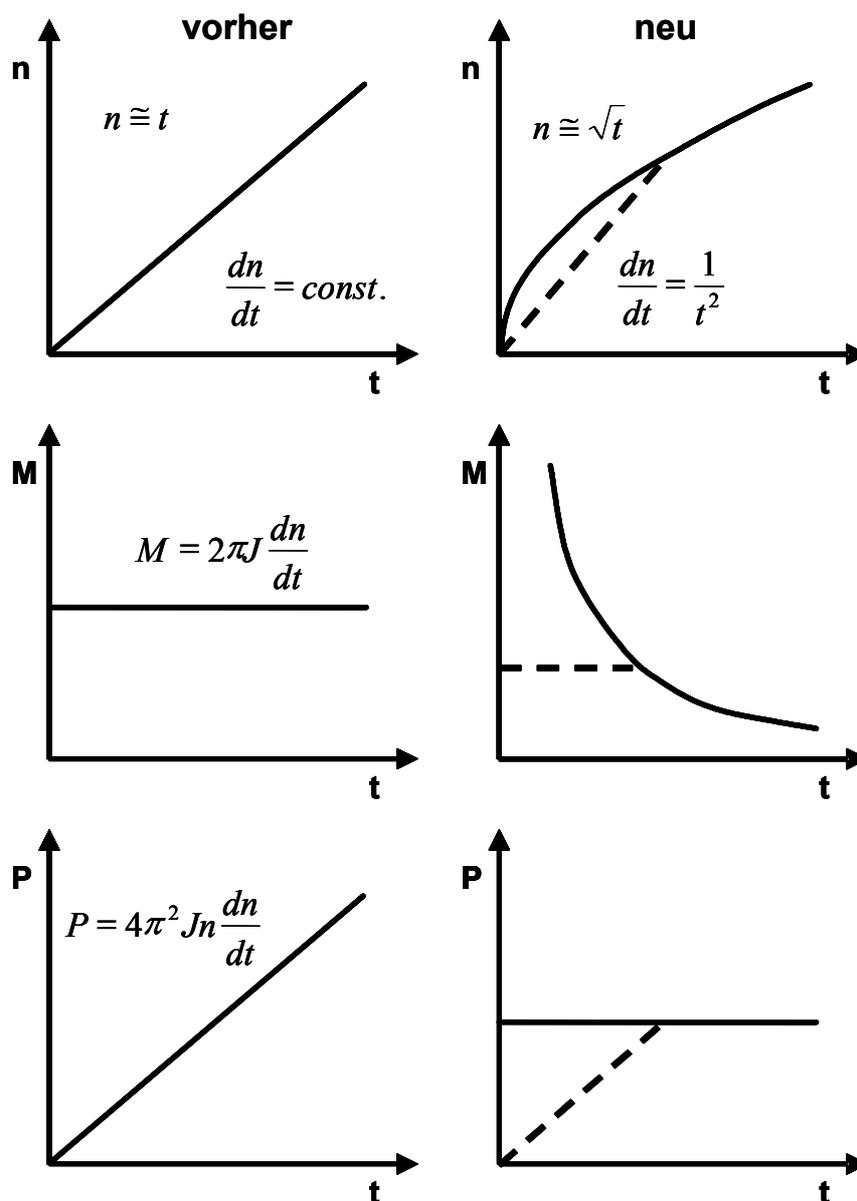


Abbildung 5-7: Abhängigkeiten der physikalischen Größen über der Zeit. Links der Beschleunigungsvorgang mit konstantem Antriebsmoment, rechts mit konstanter Leistung. Die Verläufe sind qualitativ dargestellt. Da der Motor bei leistungskonstanter Beschleunigung theoretisch bei Drehzahl null ein unendliches Moment aufbringen müsste, muss man zu Beginn des Beschleunigungsvorgangs mit konstantem Moment beschleunigen (gestrichelte Verläufe). n: Drehzahl, M: Motormoment, P: Leistung, t: Zeit.

Der oben beschriebene Prozess ist lediglich ein Auszug des realen Prozesses. Parallel wurden auch Lösungen auf eher qualitativen Betrachtungen etwa mittels der Funktionsstruktur nach TRIZ unternommen. Allerdings ermöglichte erst die Darstellung des quantitativen Systemverhaltens in allen relevanten Betriebspunkten das Erkennen der Notwendigkeit zu einer Fallunterscheidung. Ferner war sie die Grundlage für das Auffinden eines vertrauten

Analogsystems (Fall 1) und zeigte Schwachstellen des derzeitigen Konzepts für Fall 2. Die Lösungssuche wurde letztlich dadurch effizienter, dass die physikalischen Modelle sehr deutlich machten, mit welchen Parametern sich das System verändern lässt und vor allem in welchem Umfang. Es ergab sich damit deduktiv eine relativ starke Fokussierung der Lösungssuche.

5.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

In Kapitel 3 wurde deutlich, dass sich Problemmodell und das Entwickeln von Lösungsansätzen wechselseitig sehr stark beeinflussen. Die Forderung der Konstruktionsmethodik, die Problemstellung zu abstrahieren, ist hinsichtlich der Erweiterung der Assoziationsmöglichkeiten nur logisch. Das etablierte Mittel zum Zweck ist in der aktuellen deutschsprachigen Literatur eine Systemanalyse mittels Funktionsstrukturen. Funktionsstrukturen als Methoden zur Analyse sind auch in der englischsprachigen Literatur zu finden, auch wenn man ihnen dort nicht die gleiche Wichtigkeit zuzuschreiben scheint (z.B. ULRICH ET AL 1995, STOLL 1999, MAGRAB1997, CROSS 2000, OTTO ET AL 2001). Teilweise wird auf Funktionsmodellierung auch verzichtet. Problemmodellierung wird dann nur durch Marktorientierung und Erstellung von Spezifikationen unterstützt (z.B. HURST 1999), bestenfalls noch durch eine Hierarchisierung der Anforderungen (z.B. WRIGHT 1998). Es existieren auch Ansätze, Produktentwicklungsprozesse rein durch eine strategische Orientierung zu verbessern (z.B. BARCLAY ET AL 2000) Die im Systems Engineering vorgeschlagenen Modelle betonen eher die Handhabung von Komplexität. Es muss als Defizit der aktuellen Konstruktionsmethodik betrachtet werden, dass eine physikalische Modellierung der Problemstellung erst relativ spät im Produktentwicklungsprozess empfohlen wird, nämlich frühestens bei der Bewertung von Lösungsalternativen oder noch später bei deren konstruktiven Umsetzung.

Wieso aber sollte man quasi im Blindflug Lösungen entwickeln, die man anschließend wegen nicht beachteter oder quantitativ falsch eingeschätzter¹ physikalischer Randbedingungen ausschließen muss? Die Fallbeispiele legen nahe, dass physikalische Modelle neben einer effizienten Prozessgestaltung durchaus auch im Hinblick auf die kreative Entwicklung von Lösungen sinnvoll sind. Physikalische Modelle bieten die notwendige Abstraktion, weiten das Lösungsfeld also prinzipiell auf, fokussieren die Lösungssuche aber gleichzeitig auf Bereiche mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit. Damit sind sie die ideale Ergänzung zu der reinen Funktionsbetrachtung. Der Begriff „Ergänzung“ ist in diesem Zusammenhang wichtig: Die Funktionsbetrachtung ist besser geeignet, die übergeordneten

¹ Eine Beurteilung physikalischer Zusammenhänge „aus dem Bauch heraus“ führt häufig auch bei erfahrenen und guten Entwicklern zu Fehleinschätzungen.

Ziele einer Entwicklung herauszuarbeiten und im Auge zu behalten, während physikalische Problemmodelle den Blick auf prinzipielle Möglichkeiten lenkt. Wenn auf diese Weise schon früh „Wunsch und Realität“ aufeinander treffen, kann die Lösungssuche deutlich effizienter sein.

Physikalische Modelle bieten neben den oben genannten Vorteilen weitere auch politisch motivierte. Die Durchführung derartiger Methoden verlangt von den zukünftigen Anwendern keine weitere Ausbildung. Gerade als Ingenieur hat man im Studium das Handwerkszeug dazu gelernt. Man muss also lediglich die Wichtigkeit einer solchen Methode kommunizieren; Einführungsproblematiken werden damit wohl kaum bestehen. Der bei weitem noch größere Vorteil dürfte aber darin liegen, dass sich Lösungsansätze schon sehr früh besser evaluieren lassen. Gerade unkonventionelle Lösungen werden häufig nicht weiterverfolgt, weil einem die Umsetzbarkeit nicht realistisch erscheint. Viele Lösungen mit hohem Potenzial werden so wieder verworfen. Gerade sehr konservativ denkende Menschen lassen sich aber mit den unumstößlichen Argumenten der Physik überzeugen.

Wichtig bei der Erstellung physikalischer Modelle erscheinen folgende Punkte:

- Für die frühen Phasen sind in der Regel einfache Modelle zulässig. Es ist aber darauf zu achten, dass die Vereinfachungen die Realität nicht zu stark verzerren. Pauschale Empfehlungen lassen sich hier nicht geben, ein gewisses Maß an Erfahrung wird man dazu sammeln müssen.
- Es muss peinlich genau darauf geachtet werden, dass Randbedingungen im Modell nur dann als unveränderliche Größen modelliert werden, wenn sie auch wirklich unveränderlich sind. Eine Systemgrenzenerweiterung muss auch mit dem Modell möglich bleiben. Berücksichtigt man diesen Punkt nicht, läuft man Gefahr, potenzielle Lösungen von vorneherein auszuschließen.
- Das vorliegende System ist hinsichtlich seines Verhaltens auf Änderungen zu modellieren. Primär von Interesse ist also, wie das System auch quantitativ reagiert, wenn Parameter geändert werden. Es geht hierbei um Trends, nicht um Zustände wie dies etwa bei FEM-Berechnungen der Fall wäre.
- Das entwickelte Modell muss verstanden werden. Dazu helfen Darstellungen, aber auch Analogien. Gerade rotatorische Systeme sind nicht allzu anschaulich. Eine Übersetzung von Rotationen in Translationen ist also häufig zielführend. Wenn wir es schaffen, durch Analogien uns vertrautere Systeme zu assoziieren, dürfte der Zugriff auf Gedächtnisinhalte leichter erfolgen.

Physikalische Problemmodelle können je nach Anwendungsfall unterschiedlich sein. Bei sehr schwer formelmäßig zu modellierenden Systemen ist es sicherlich schon hilfreich, sich grundlegende Parameter bewusst zu machen. Im Grunde bekommt man diese sehr einfache Methode bereits in der Schule im Physikunterricht beigebracht. Dort wird einem

empfohlen, für die Lösung einer Aufgabe Größen in „Gegebene“ (...Größen der Aufgabenstellung) und „Gesuchte“ einzuteilen und zu notieren. Für die Produktentwicklung ist diese Einteilung der Größen unsinnig. Zielführender wäre hier eine Unterscheidung in veränderbare und unveränderbare Parameter.

Die Verbesserung eines derartig einfachen Modells ist es, Wechselwirkungen zumindest qualitativ aufzunehmen. Daraus lassen sich dann bereits sehr gut Zielkonflikte ableiten. Bekannte Methode hierzu ist das Gegenüberstellen von Größen in Matrizen. Derartige Matrizen firmieren in der Literatur z.B. unter den Begriffen Beeinflussungsmatrix (DAENZER 2002), Anforderungsmatrix (LINDE 1993), Korrelationsmatrix (QFD).

Die Modellierung des Systemverhaltens ist mit Sicherheit das Optimum, dürfte aber nicht in allen Fällen möglich oder wirtschaftlich sein. Da formelmäßige Zusammenhänge meist nur sehr schlecht erfassbar sind, empfiehlt es sich hierbei, das Systemverhalten durch Diagramme darzustellen. Programme zur Tabellenkalkulation sind hierbei unschätzbar wertvolle Hilfsmittel.

Aus wissenschaftlicher Sicht wäre es sicherlich zielführend, oben aufgeführte Beobachtungen und Schlussfolgerungen noch in weiteren Fallstudien zu validieren und zu erweitern. Auf Basis eines breiteren Erfahrungshintergrundes ist es sicherlich möglich, dem Konstrukteur detailliertere Hilfestellungen als die o.g. zu geben, in welchen Fällen physikalische Modelle in welcher Form zielführend sind, aber auch wo Risiken lauern.

6 Methodische Ansätze für die Lösungssuche mittels Bionik

In Kapitel 6 werden methodische Ansätze für die wohl älteste von Menschen angewandte Methode zur Lösungssuche vorgestellt. In dieser Tradition sollen Hilfestellungen gegeben werden, Bionik in ihrer ursprünglichsten Fassung zu betreiben: Nämlich, sich für die Lösung technischer Probleme von der belebten Natur inspirieren zu lassen. Die für diese Zielsetzung bislang bestehenden Methoden sind wie in Kapitel 4 ausführlich dargestellt nur wenig befriedigend. So setzen die im Folgenden beschriebenen Methoden an der Modellierung eines auf Fallstudien basierenden idealtypischen Vorgehens an und münden in einem Werkzeug, das die Suche nach Analogien erleichtert.

6.1 Erweitertes Vorgehensmodell für die Lösungssuche mittels Bionik

In der Konstruktionsforschung haben sich Vorgehensmodelle zur Beschreibung von Produktentwicklungsprozessen etabliert. Diese Darstellungen sollen dem Anwender zu einer Verbesserung der eigenen Vorgehensweise bei der Bearbeitung technischer Problemstellungen verhelfen. In den Anfängen waren diese Modelle sehr stark auf den Konstruktionsprozess fokussiert. Beeinflusst durch das Systems Engineering und den Dfx-Gedanken wurden sie sukzessiv über die anfänglich gesetzte Grenze hinaus erweitert. Bei dieser Entwicklung zeigte sich zunehmend deutlich, dass ein Prozess, der möglicherweise mit einer Marktanalyse beginnt und mit einem Troubleshooting endet, kaum verallgemeinerbar, geschweige denn in seiner Komplexität vollständig darstellbar ist.

Modelle aus der Anfangsphase der Konstruktionsforschung weisen einen präskriptiven und stringenten Charakter auf, dem reale Prozesse allenfalls in Ansätzen entsprechen. CLIFFORD (1998, S. 7) beschreibt die Natur des Problemlösungsprozesses folgendermaßen: „The fundamental nature of design problems is such as to require an iterative process in order to generate workable solutions. Frankly, it is unusual for most real-world design problems to be solved using a purely linear methodology (i.e. a simple step-by-step way of doing things).“ Aus diesem Grund tendieren aktuelle Modelle zu netzwerkartigen Darstellungen („Münchener Vorgehensmodell“ in LINDEMANN 2003B und HYMAN 1998, S. 8ff). Derartige Modelle lassen sich a posteriori relativ gut in Übereinstimmung mit realen Prozessen bringen. Sie sind deshalb auch gut geeignet, einen realen Prozess anhand ihrer

Strukturierung zu reflektieren. Die individuelle Bewertung des Prozesses bietet so die Möglichkeit, die heuristische Kompetenz zu verbessern.

A priori bieten netzwerkartige Vorgehensmodelle eher mittelbare Hilfestellungen. Dies liegt daran, dass sie weniger ein Prozessmuster abbilden, als vielmehr eine Sammlung an „Wegpunkten“, an denen vom Anwender situativ das weitere Vorgehen entschieden werden muss. Der Entwickler soll so verstärkt zu einer selbständigen Planung des Prozesses angeregt werden. Unter „Wegpunkten“ sind dabei Handlungsabschnitte zu verstehen, die weniger durch einen inhärenten, womöglich normierbaren Prozess, als vielmehr durch ein Ziel charakterisiert sind. Zuordnbare Methoden sollen den Entwickler unterstützen, diese Ziele zu erreichen.

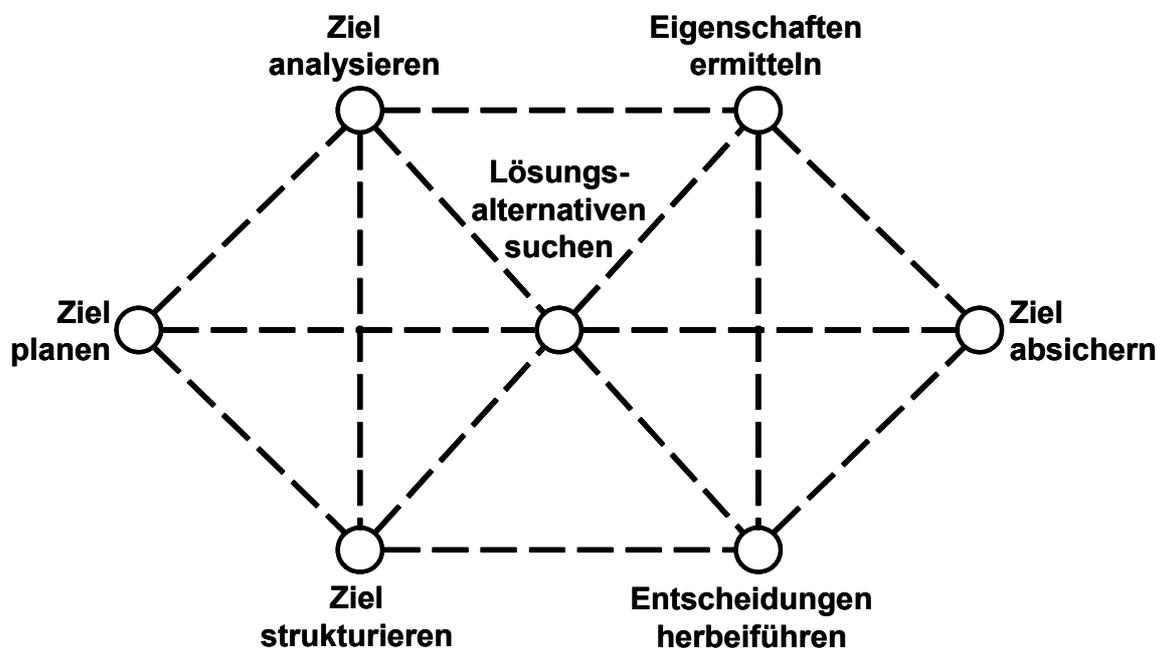


Abbildung 6-1: Münchener Vorgehensmodell (nach LINDEMANN 2003B).

Der durch die obigen Ausführungen möglicherweise entstandene Eindruck, netzwerkartige Darstellungen seien das Maß aller Dinge, ist in seiner Absolutheit sicherlich nicht korrekt. Auf anderen Betrachtungsebenen können Prozesse durchaus auch sehr exakt beschrieben werden. Das TOTE-Schema, welches auf elementarster Ebene anzusiedeln ist, bietet mit seiner einzigen Handlungsoption zu Recht keinerlei weitere Freiheitsgrade – es befindet sich gänzlich außerhalb unseres Einflusses. Je weiter man sich von dieser elementaren Ebene entfernt, desto mehr Handlungsoptionen und damit Freiheitsgrade existieren und desto komplexer wird ein darzustellender Prozess. Bei zunehmender Komplexität werden demzufolge Darstellungen entweder ebenfalls immer komplexer ausfallen, oder um dies zu vermeiden, zunehmend abstrakt. Einen dritten Weg geht ALTSCHULLER (1986) mit seinem

Vorgehensplan ARIZ. Da das Vorgehen dort sehr konkret beschreibbar ist, aber zu komplex, um in einem Diagramm dargestellt werden zu können, liegt es in rein textueller Form mit Querverweisen vor. Letztlich geben also im Wesentlichen die Freiheitsgrade eines abzubildenden Prozesses seine Darstellung vor. Flussdiagramme (TOTE) und Netzwerke („Münchener Vorgehensmodell“) bilden hier sicherlich die Extrempunkte der graphischen Darstellungen.

6.1.1 Bionisches Vorgehensmodell

Wie im Kapitel 4.5.3.1 aufgezeigt, existieren für die Anwendung von Bionik für die Lösungssuche nur wenig methodische Hilfestellungen. In einem ersten Schritt sollen mittels eines Vorgehensmodells die typischen Schritte bei der Lösungssuche durch Bionik hinsichtlich ihrer logischen Sequenz und dem unterstützenden Methodeneinsatzes diskutiert werden.

Das bionische Vorgehensmodell stellt eine Erweiterung der bestehenden Modelle in der Konstruktionsmethodik dar. Bezogen auf das „Münchener Vorgehensmodell“ (vgl. Abbildung 6-1) spezifiziert es primär die Abschnitte „Ziele formulieren“ und „Lösungsalternativen suchen“. Die in Kapitel 4.5.3.2 genannten Entwicklungsprozesse einer Fallstudie wiesen einen verallgemeinerbaren und relativ konkret beschreibbaren Prozess bei der Lösungssuche mittels Bionik auf. Das Modell beruht also letztlich auf dem „natürlichen“ Vorgehen der Studenten in Verbindung mit der kritischen Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und des geplanten Vorgehens mit mir als Betreuer der Arbeiten. Es existieren in diesem Modell demzufolge Abschnitte, die eher handlungsorientiert sind („Handlungsabschnitte“ der Studenten) und solche, die orientierenden und damit fragenden Charakter haben („Entscheidungspunkte“ bei Besprechungen). Handlungsabschnitte und Entscheidungspunkte weisen dabei auf einem bestimmten Abstraktionsniveau eine relativ strenge logische Sequenz auf, die nur in überschaubarem Ausmaß Freiheitsgrade bietet. Es ist also in diesem Fall gut möglich, das Vorgehensmodell in Form eines Flussdiagramms darzustellen (vgl. Abbildung 6-2).

Das Modell zerfällt in die Handlungsabschnitte „Formulieren des Suchziels“, „Zuordnung biologischer Systeme“, der „Analyse der zugeordneten Systeme“ und der „technischen Umsetzung“. Sie beinhalten selbst Schritte zur Analyse, Synthese und Bewertung, die hier nicht gesondert dargestellt sind. Die Handlungsabschnitte werden durch drei Entscheidungspunkte erweitert, die Iterationen oder das Verlassen der Sequenz erlauben. Letztlich entstanden sie durch das Infragestellen der einzelnen Handlungsabschnitte. Die Handlungsabschnitte selbst beinhalten eigene Schritte, die nur schwer verallgemeinerbar sind und deshalb hier nicht dargestellt werden.

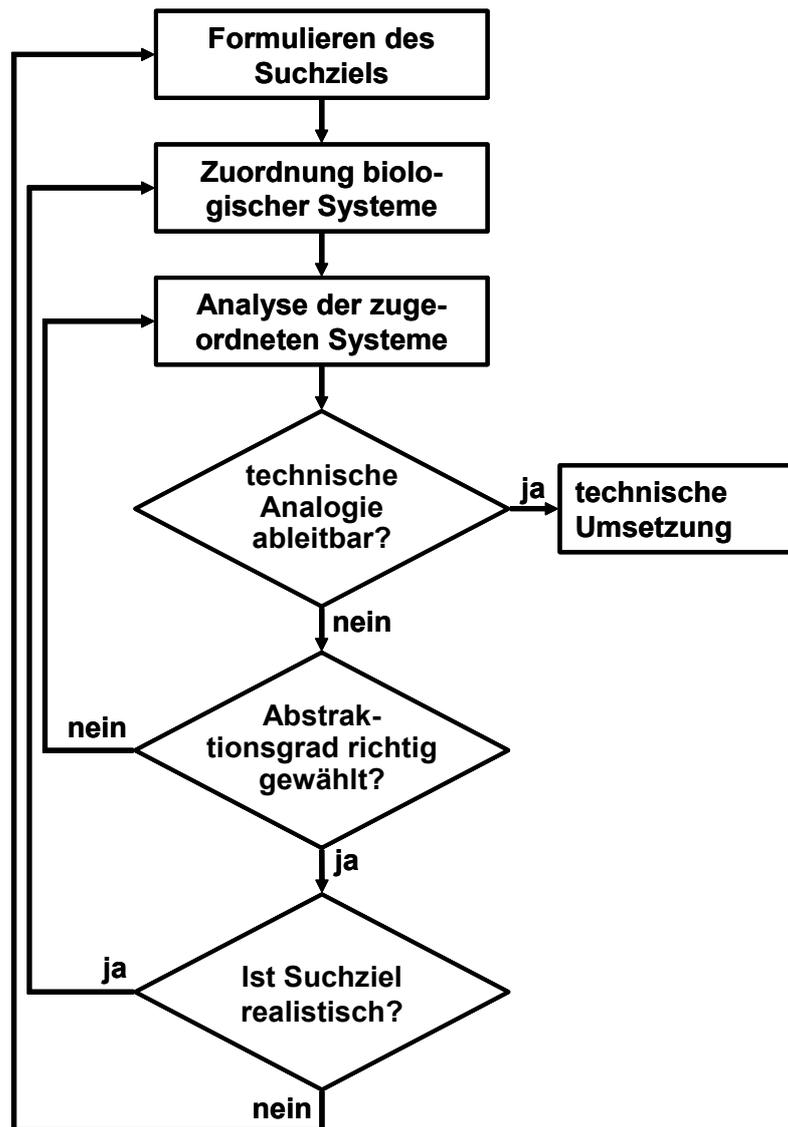


Abbildung 6-2: Bionischer Vorgehenszyklus resultierend aus den Fallstudien in Kapitel 4.5.3.2.

Die Sequenz beginnt mit der Formulierung eines Suchziels. Die Definition des letztlich technischen Ziels der Suche ist die Basis zu der Systeme in der Natur zugeordnet werden können. Diese müssen in einem weiteren Schritt analysiert werden, um zu prüfen, ob sich daraus sinnvolle technische Analogien ableiten lassen. Erscheint eine technische Umsetzung sinnvoll, kann die Suche abgebrochen werden. Erscheinen die gefundenen Ansätze nicht umsetzbar und/oder nicht der technischen Problemstellung angemessen, geht man zum nächsten Entscheidungspunkt über. Hier stellt sich die Frage, ob der Abstraktionsgrad der Betrachtung richtig gewählt war. Ggf. ist das gefundene System auf höherem Abstraktionsniveau erneut zu analysieren. Scheinen die gefundenen Ansätze nicht angemessen, aber der Abstraktionsgrad richtig gewählt, gilt es zu prüfen, ob die Suche nicht erfolgreich war, weil die Zielformulierung nicht angemessen war, oder weil die Suche bislang einfach

noch nicht erschöpfend erfolgt ist. Je nachdem erfolgt eine Iteration entweder beginnend mit der erneuten Formulierung des Suchziels, oder direkt mit der Zuordnung biologischer Systeme. Das Modell ist in seiner Darstellung sehr optimistisch gehalten – ein Handlungsabbruch ist nicht dargestellt. In Realität kann die Suche nach Lösungen in der Natur schlichtweg wegen Ressourcenmangel, Frustration oder anderen denkbaren Gründen jederzeit abgebrochen werden. Eine Darstellung dieser letztlich trivialen Abbruchsequenzen würde das Modell allerdings nur unnötig verkomplizieren.

Die Schwierigkeiten bei der Lösungssuche mittels Bionik basieren sicherlich kaum auf der mangelnden Kenntnis der oben beschriebenen banalen Aneinanderreihung einzelner Handlungsabschnitte. Anspruchsvoll ist vielmehr die effiziente und effektive Durchführung der einzelnen Abschnitte. Hierbei bieten sich eine Reihe etablierter Methoden an, deren (exemplarische) Integration im Folgenden herausgearbeitet werden sollen:

Formulieren des Suchziels

Das Formulieren eines Suchziels kann relativ systematisch auf Basis der Analyse der technischen Problemstellung erfolgen¹. Prinzipiell scheinen zwei Ausprägungen denkbar: Das Adressieren einer zu erfüllenden Funktion oder gemeinsamer Randbedingungen. Zu erfüllende Funktionen werden auf einer Funktionsbetrachtung basieren. Eine solche kann (muss aber nicht) durch das Aufstellen eines Funktionsmodells unterstützt werden. Welche Art von Funktionsmodellierung dabei zu bevorzugen ist, ist wie sonst auch situativ zu entscheiden. Eine an einer Funktion („System vor Frost schützen“) orientierte Formulierung kann z.B. „Welche Organismen existieren, die besonders gut ihre hohe Körpertemperatur aufrechterhalten können?“ lauten.

Die Suche nach potenziellen Analogien kann auch über vergleichbare Randbedingungen erfolgen. Dazu dürfte eine eher physikalische Problemmodellierung (vgl. Kapitel 5) zu bevorzugen sein. Eine entsprechende Formulierung könnte folgendermaßen lauten: „Wo herrschen extrem niedrige Außentemperaturen und welche Organismen haben sich daran angepasst?“ Hierbei ist schon vorab zu berücksichtigen, dass sich technische und biologische Randbedingungen in Summe sehr stark unterscheiden können. Dem Beispiel entsprechend wird weder das technische, noch das biologische System alleine der genannten Randbedingung ausgesetzt sein.

Unabhängig von der Herangehensweise bieten abstraktere Formulierungen eine höhere Trefferquote bei der anschließenden Suche nach potenziellen Analogien (vgl. auch Kapitel 3: Aktivationsausbreitungsmodell). Stellt man z.B. statt der Formulierung „Welche Organismen existieren, die besonders gut ihre hohe Körpertemperatur aufrechterhalten kön-

¹ Für die Suche nach Lösungen für technische Problemstellungen muss eine Motivation bestehen. Der vorgeschaltete Prozess etwa einer Schwachstellenanalyse o.ä. wird in der Literatur erschöpfend dargestellt und soll hier nicht weiter betrachtet werden.

nen?“ die Frage nach „Organismen, die Wärmestrahlung absorbieren können“, wird man statt einer Vielzahl von Tieren (alle Säugetiere und Vögel, nach WEHNER&GEHRING (1992, S. 774) rund 13.060 rezente Arten) nur mehr auf eines stoßen – den Eisbären mit seiner schwarzen Haut unter lichtdurchlässigem, wärmeisolierendem Fell. Die an Randbedingungen orientierte Frage „Wo herrschen extrem niedrige Außentemperaturen und welche Organismen haben sich daran angepasst?“ bietet in diesem Beispiel sogar eine noch größere Auswahl an Organismen, nämlich solche, die auch mit extrem niedrigen Körpertemperaturen überleben können. Dazu zählen Fische und Garnelen der Polarmeere, die über eine Art „Frostschutzmittel“ verfügen, sowie einige Algen und Bakterien.

In Kapitel 3.4 wurde dargestellt, dass der Mensch allem Anschein nach nur sehr begrenzt über Relationen Zugang zu im Langzeitgedächtnis gespeicherten Informationen finden kann. Dementsprechend scheint es zielführender Suchziele „objektorientiert“ etwa in der Form „welche Organismen existieren, die...“ zu formulieren. Vor diesem Hintergrund scheinen Formulierungen, die sich über eine Reihe von Objekten einer Relation annähern wie dies über den Zugang über Randbedingungen (z.B.: 1. Habitate, 2. Organismen, 3. Organe 4. Wechselwirkungen) der Fall ist, von Vorteil zu sein.

Zuordnung biologischer Systeme

Die Assoziation biologischer Systeme zu einer technischen Problemstellung erfordert ein gewisses Maß an (biologischem) Grundwissen. Dieses wird einem zum großen Teil in der Schule vermittelt. In den Medien finden sich zahlreiche populärwissenschaftlich aufbereitete Sendungen und Artikel, die einem ermöglichen, dieses Grundwissen äußerst bequem zu erweitern. Letztlich stellt Grundwissen einen sicherlich wichtigen (und erstrebenswerten) Part bei der Assoziation biologischer Systeme dar, es lässt sich aber wohl kaum ad hoc erzeugen. Um dennoch die Zahl assoziierter Systeme zu erhöhen, bieten sich einige Strategien an. Da technische Entwicklungen selten von einer Einzelperson unternommen werden ist es zweckmäßig, den heterogenen Wissensstand eines Teams auszunutzen. Einfaches (einzelnes) Befragen der Teammitglieder anhand der Formulierung des Suchziels ist ein erster denkbarer Schritt. Bestehen innerhalb eines Teams Hemmungen auch unkonventionelle Assoziationen zu äußern, kann es hilfreich sein, wenn man diese im Rahmen eines Brainstormings abrufen. Beide Varianten sind sehr unkompliziert und wenig aufwändig.

Scheint die Erhebung von Assoziationen im direkten Arbeitsumfeld nicht erfolgreich, können Experten hinzugezogen werden. Experten müssen in diesem Zusammenhang keine besondere wissenschaftliche Qualifizierung aufweisen. Vielmehr ist hier unter einem Experten schlichtweg eine Person zu verstehen, die sich etwas mehr für das Thema Biologie interessiert (also über ein höheres Grundwissen verfügt), als der Durchschnitt der Ingenieure. Für Firmen könnte es sich anbieten, befristet einen Biologiestudenten einzustellen. Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis dürfte angesichts der Unterstützung in weiteren Schritten wie der Informationsbeschaffung und -auswertung bemerkenswert sein: Neben seinem sehr

viel größeren Grundwissen hat ein Biologiestudent Zugang zur Universitätsbibliothek, versteht die Ordnungssystematik der dort verfügbaren Literatur, scheitert nicht an fachspezifischen Begriffen, hat einen besseren Zugang zu weiteren Experten an Lehrstühlen u.v.m.

Etwas zeitaufwändiger aber sicherlich machbar ist es, sich von Literatur anregen zu lassen. Durch eine systematische Suche lassen sich so Systeme finden, die sich der Formulierung des Suchziels zuordnen lassen. Standardwerke der Zoologie und der Botanik sowie Schulbücher scheinen geeignete Quelle für eine solche freie Suche zu sein. Gerade Standardwerke bieten oftmals wissenschaftlich korrekt formulierte Querverweise, falls in späteren Phasen weitere Informationen zu einem spezifischen Thema zu gewinnen sind.

Generell ist Zuordnung biologischer Systeme nicht zu unterschätzen. Aufgrund des meist nur unzureichenden spezifischen Wissensstands unter Ingenieuren besteht hier eine Barriere, die den Zugang zu potenziellen biologischen Vorbildern deutlich erschwert. Dies zeigte sich auch stets als Problem bei den in Kapitel 4.5.3.2 angesprochenen Fallstudien, bei denen Studenten des Maschinenwesens basierend auf technischen Problemstellungen Lösungen mittels Bionik erstellen sollten. Dies ist umso drastischer zu bewerten, als dass sich um die entsprechenden Studienarbeiten mit Sicherheit Personen bemüht haben, die ohnehin ein etwas größeres Interesse für die Thematik aufbringen als der Durchschnitt. Um die ersten Schritte bei der Suche nach interessanten biologischen Systemen für den „Standardingenieur“ zu erleichtern, wird in Kapitel 6.2 ein Hilfsmittel vorgestellt, das basierend auf technischen Funktionen über zugeordnete Stichwörter einen Zugang zu Suchfeldern in biologischer Literatur ermöglichen soll. Im Gegensatz zu der Zuordnung biologischer Systeme liegen die weiteren Schritte bei der Lösungssuche mittels Bionik sehr viel deutlicher im Kompetenzbereich des Ingenieurs.

Analyse der zugeordneten Systeme

Die gewonnenen potenziellen Analogien müssen in einem weiteren Schritt analysiert werden. So zählt es sicherlich zum Allgemeinwissen, dass Steinböcke im Gebirge über eine beneidenswerte Geländegängigkeit verfügen, die sich die meisten Bergsteiger trotz mit Gummi besohlter Bergstiefel nur wünschen können. Dass hier ein besonderer Zusammenhang zwischen den Hufen des Steinbocks und dem Gestein, auf dem er sich bewegt herrschen muss, ist ein nahe liegender logischer Schluss. Genauere Informationen über diesen Zusammenhang, der aber Voraussetzung für eine mögliche technische Umsetzung ist, dürfte allerdings nicht mehr Teil des Allgemeinwissens sein.

Die Informationsgewinnung bietet prinzipiell keine Überraschungen. Die denkbaren Quellen – Internet, „Experten“, Literatur – ähneln mit Ausnahme von Patentschriften und Konkurrenzprodukten denen bei technischen Recherchen üblicherweise verwendeten. So fanden sich z.B. für die Fragestellung, wodurch die Hufe des Steinbocks (*Capra ibex*) einen

enorm guten Halt selbst in steilstem Gelände ermöglichen, sofort vier relevante Seiten¹ im Internet. In den in Kapitel 4.5.3.2 angesprochenen Fallstudien zeigte sich dennoch, dass gerade in der biologischen Fachliteratur für eine technische Umsetzung relevante Informationen häufig nicht vorzufinden sind (entsprechendes gilt natürlich in der Regel auch für Experten in diesem Bereich). Dies dürfte daran liegen, dass die Biologie überwiegend um die Beschreibung biologischer Systeme bemüht ist - eine mögliche technische Nutzung ist für die Biologie gänzlich uninteressant. So findet man etwa sehr viel Material zu unterschiedlichen Zahnformen und -anordnungen von Schneckenzungen, nicht aber die (physikalische) Erklärung, warum dies so ist. Dass die Unterschiede von Schneckenzungen in Zusammenhang mit Nahrungsquellen und evolutionärer Entwicklungen stehen ist zwar nahe liegend, wird aber in der Fachliteratur nicht weiter ausgeführt.

Sind relevante Informationen nicht verfügbar, ist man gezwungen, diese anderweitig zu gewinnen. In überschaubaren Fällen kann eine physikalische Modellbildung und Berechnung ausreichend sein. Häufig werden derartige Modelle aber so komplex sein, dass es sinnvoll ist, Versuche durchzuführen. Bemüht man sich derartig um absolute Aussagen über ein biologisches System, betreibt man gemäß der Definition von NACHTIGALL (1998) „Technische Biologie“. Wie Veröffentlichungen aus diesem Bereich zeigen, ist der Aufwand hierbei häufig enorm.

Für technische Fragestellungen in frühen Phasen der Lösungssuche ist es zunächst meist ausreichend, eine relative Aussage über das System zu treffen. Ist die Frage beantwortet, ob ein biologisches System auf einem zu definierenden Abstraktionsgrad technisch umgesetzt Vorteile gegenüber bestehenden technischen Systemen bietet, lässt sich sicherlich auch ein im Sinne der technischen Biologie höherer Aufwand für die Analyse rechtfertigen. Es ist klar, dass eine solches etwas „hemdsärmeliges“ Vorgehen auch zum Misserfolg führen kann: Bildet man bei der vorläufigen Übertragung eines biologischen Systems für einen orientierenden Versuch aufgrund des Informationsmangels falsche Hypothesen, wird man auch dementsprechende Ergebnisse erhalten. Fehler kann man hierbei neben der Beachtung versuchsmethodischer Kenntnisse durch ein paar einfache Maßnahmen aber zumindest reduzieren:

- Hilfreich ist es sicherlich, Hypothesen auf relevante Parameter auszudehnen, die man in einem Versuch unabhängig voneinander untersuchen kann (z.B. Geometrie und Zahl eines Elements).

¹ Die Suche mit „www.google.de“ und den Suchbegriffen „Capra ibex“ und „klettern“ ergaben 21 deutschsprachige Seiten, von denen vier relevant waren. Die Hufe verfügen über eine weiche Lauffläche und einen harten Rand aus Horn. Die Behauptung auf einer Seite, es handele sich damit prinzipiell um Saugnäpfe ist sicherlich falsch. Zusätzlich verfügt der Steinbock über zwei „Felssporne“ je Huf, die sich zusätzlich am Untergrund verhaken können.

- Des Weiteren empfiehlt sich eine physikalische Berücksichtigung der Randbedingungen. Oftmals liegt zwischen technischem und biologischem System ein Skalierungsfaktor. Gerade bei strömungsmechanischen Phänomenen können hierbei Fehler unterlaufen: Ein Pantoffeltierchen ist bezogen auf seine Größe ein enorm schneller Schwimmer. Nimmt man die Gestalt des Pantoffeltierchens dementsprechend als ideal für einen Schiffsrumpf an, muss dies zu einem Misserfolg führen, da Pantoffeltierchen entgegen Schiffen laminar umströmt sind. Modelle für orientierende Versuche sollten also den Ähnlichkeitsprinzipien („Modelltheorie“) entsprechen (ZERBST 1987, S.28ff). Entsprechendes gilt natürlich auch für geometrische Vereinfachungen.
- Bei vergleichenden Versuchen empfiehlt es sich, für ähnliche „Optimierungsgrade“ zu sorgen. Der Vergleich eines stark vereinfachten, bionischen Konzepts mit einem ausgereiften technischen Produkt wird wohl nur selten für Überraschungen sorgen. Zur Abschätzung eines Potenzials sollten sich bionisches Konzept und technisches Pendant auf „vergleichbarem Niveau“ befinden. Dies erfordert ggf. die (geometrische) Abstraktion der technischen Referenz.

Orientierende Versuche können sehr schnell und unkompliziert zu Ergebnissen führen. Insgesamt ist das Thema der Versuchsplanung hier aber auf keinen Fall zu unterschätzen. Eine intensive Beschäftigung mit Versuchsmethodik (Bernard 1999), oder die Integration eines entsprechenden Experten ist dringend zu empfehlen. Ansonsten gilt wohl der Spruch: „Wer misst, misst Mist!“

Ist eine technische Analogie ableitbar?

Die Bewertung der Übertragbarkeit schließt sich an die Analyse der potenziellen Analogien an. Wie bei technischen Bewertungen von Lösungsalternativen kann es ggf. hilfreich sein, diese interdisziplinär und unter Verwendung von Bewertungsmethoden durchzuführen. Dabei ist zu einem gewissen Maße eine Umsetzung zu antizipieren – ein Unsicherheitsfaktor, dem unter Umständen Rechnung zu tragen ist. Scheint ein biologisches System nicht für eine Übertragung geeignet, muss dies nicht zu einem Abbruch der Handlung führen. Vielmehr sind noch die folgenden Fragestellungen zu beantworten.

Abstraktionsgrad richtig gewählt?

In der Regel werden sich biologische Vorbilder nicht 1:1 in technische Lösungen umsetzen lassen. Die Wachscuticula einer Lotusblüte ist strukturiert, um eine starke Hydrophobierung für den bekannten Selbstreinigungseffekt zu erreichen. Bei den Strukturen handelt es sich um faserige, eiförmige Erhebungen. Weder Werkstoff (Wachs) noch Geometrie sind technisch sinnvoll umsetzbar. Für die Umsetzung muss das biologische Vorbild also abstrahiert werden. Im Fall des Lotuseffekts für technische Oberflächen wurde z.B. eine Folie mit in der Größe den Erhebungen des Lotusblatts vergleichbaren „Pyramiden“ geprägt, um das biologische Prinzip auszunutzen.

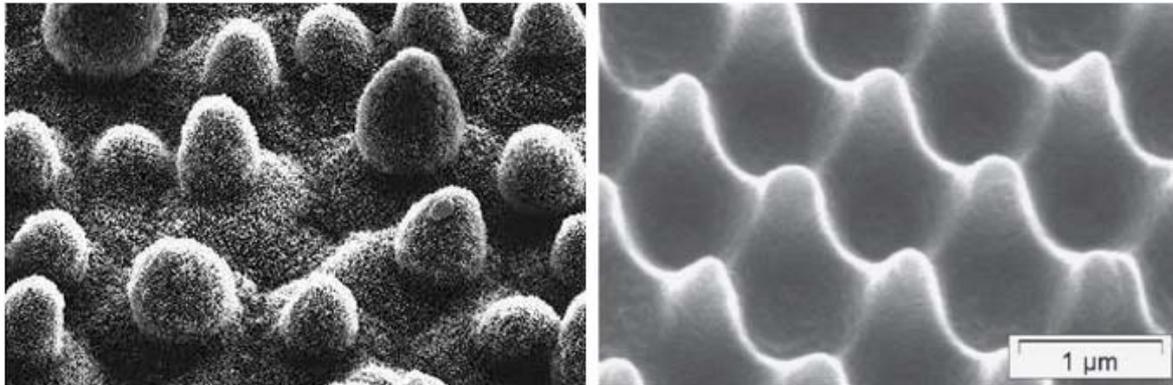


Abbildung 6-3: Blattoberfläche des Lotus (links) und technische Interpretation (rechts).

Scheint ein biologisches System in erster Instanz also nicht umsetzbar, kann dies daran liegen, dass man versucht hat, es auf zu konkretem Niveau zu übertragen. In diesem Fall ist es hilfreich, das biologische System erneut auf einem höheren Abstraktionsniveau zu analysieren und auf Übertragbarkeit hin zu überprüfen (vgl. auch das Vorgehen bei der progressiven Abstraktion nach SCHLICKSUPP 1989). Sollte das Abstraktionsniveau angemessen erscheinen oder bereits so hoch sein, dass kein Unterschied mehr zu bestehenden technischen Systemen erkennbar ist, sollte zur nächsten Fragestellung übergegangen werden.

Ist Suchziel realistisch?

Gerade sehr konkret formulierte Suchziele können den Suchraum stark eingrenzen. Sucht man etwa nach biologischen Systemen, die elektromagnetische Wellen emittieren, wird man noch fündig werden (z.B. Biolumineszenz des Glühwürmchens). Sucht man hingegen nach biologischen Systemen, die UV-Licht oder noch kurzwelligere Strahlung emittieren, wird man nach dem heutigen Wissensstand wohl gänzlich ohne Erfolg bleiben. Hat man also keine oder keine umsetzbar erscheinende Systeme gefunden, kann es sinnvoll sein, das Suchziel aufzuweiten und erneut Zuordnungen zu treffen. Sollte das Suchziel der Problemstellung entsprechend nicht weiter verallgemeinerbar erscheinen, kann es sein, dass die Suche nach denkbaren Zuordnungen noch nicht erschöpfend war. U.U. ist diese also unter Verwendung der o.g. Hilfestellungen zu wiederholen. Letztlich - und diese Gefahr besteht immer - ist es natürlich auch möglich, dass ein entsprechendes biologisches System ganz einfach nicht existiert (z.B. Emitter von UV-Licht). Ein demzufolge zwingender Abbruch der Handlung ist im Modell nicht dargestellt.

6.1.2 Fallbeispiel: Entwicklung einer Staubsaugerdüse

Staubsauger (genauer: Bodenstaubsauger) sind seit den letzten Jahrzehnten in ihrem Konzept, abgesehen von kaskadierten Filtersystemen und Zyklotronfilter bei einem der Her-

steller, relativ unverändert geblieben. Inzwischen ist die elektrische Leistungsaufnahme dieser Geräte bis auf über 2000 Watt gestiegen - die Leistung gilt in der Branche als das Kaufkriterium schlechthin (ERNZER & OBERENDER & BIRKHOFER 2002). Unter den Kleingeräten in Haushalten gehören Staubsauger damit mittlerweile zu den größten Energieverbrauchern¹; Dabei macht die Leistung noch keine direkte Aussage über das Saugergebnis (ROSEMANN & MEERKAMM 2002). Globales technisches Ziel für eine Studienarbeit (FRITSCH 2002) war es folglich, Konzepte für Staubsaugerkomponenten zu finden, die ein besseres Saugergebnis auch ohne eine Steigerung der elektrischen Leistung ermöglichen.

Zu Beginn wurden typische Konzepte für Bodenstaubsauger auf ihre Schwachstellen hinsichtlich der Zielsetzung analysiert. Dazu wurde das System zunächst mithilfe einer umsatzorientierten Funktionsbetrachtung modelliert, und den Funktionen Bauteile zugeordnet. Als zentrale Funktionen erschienen in diesem Zusammenhang die Ablösung des Schmutzes vom Untergrund durch die Düse, die Leitung des Luft/Schmutzgemisches durch Saugrohr und -schlauch und die anschließende Trennung von Schmutz und Luft im Filter und die Erzeugung des Luftstroms durch Gebläse und E-Motor. Basierend auf diesen Funktionen wurden als verbesserungswürdige Schwachstellen die strömungsungünstige Gestaltung von Düsen, Saugrohren und -schläuchen, sowie Filtern neben der unzulänglichen Schmutzablösung durch die Fadenheber an der Düse identifiziert.

Aufbauend auf dieser Systemanalyse galt es nun, den zu verbessernden technischen Funktionen biologische Systeme zuzuordnen, die vergleichbare Funktionen erfüllen. Dementsprechende Formulierungen des Suchziels lauteten etwa „Welche Organismen existieren, die Partikel von Oberflächen entfernen?“ oder „Wo in der Natur sind Fluide mit Partikeln versetzt und welche Organismen/Organe trennen die Partikel vom Fluid?“. Erste in einer Besprechung gesammelte Assoziationen waren hierbei Systeme der Nahrungsaufnahme im Allgemeinen, die zu weiteren Assoziationen führten. Dazu zählten beispielsweise Filterkonzepte von Schwämmen, Raspelzungen von Schnecken, Insektenrüssel, die klebrigen Zungen von Fröschen, Zungen von Katzen zur Fellpflege und einige mehr.

Da sich innerhalb kürzester Zeit eine Fülle von Assoziationen ergeben hatten, deren Analyse den Rahmen der Arbeit gesprengt hätte, wurde nach einer ersten, oberflächlichen Recherche in Internet und Literatur eine Vorauswahl getroffen: Auf den ersten Blick schienen vor allem die von Staubsaugerdüsen deutlich abweichenden Kanalstrukturen der Spitze von Fliegenrüsseln für die Staubaufnahme sehr vielversprechend. Die zahnartigen Strukturen auf Katzen- und Schneckenzungen boten sich als Alternative zu den bestehenden Fadenhebern an.

¹ Zu den Kleingeräten innerhalb des Haushalts zählen nicht Kühlschränke, Herde, Waschmaschinen und Trockner. Diese werden als Großgeräte bezeichnet und verbrauchen ihrem Namen entsprechend auch deutlich mehr Energie. Neben Staubsaugern zählen zu den Kleingeräten Mikrowellen, Kaffeemaschinen, Haartrockner und ähnliche.

Nach der Vorauswahl der potenziellen Analogien wurde die Informationsbeschaffung bezüglich der Kanalstrukturen von Fliegenrüsseln und der unterschiedlichen Zahnformen und -anordnungen von Schnecken- und Katzensungen intensiviert. In der Fachliteratur fanden sich dabei reichlich Informationen zu artspezifischen Unterschieden der Strukturen, die für die technische Nutzung interessantere Erklärung, warum sich die Strukturen in der vorliegenden Form entwickelt haben, war nicht auffindbar. Auch zu diesem Thema befragte Experten für Insekten und Mollusken an benachbarten Biologieinstituten konnten diese Frage aus technischer Sicht nicht vollständig zufriedenstellend beantworten. Ganz offensichtlich waren derartige Fragestellungen seitens der Biologie noch nicht aufgetreten.

Die Recherche allein erbrachte also nicht die gewünschten Informationen. Es war folglich notwendig, diese Informationen eigenständig zu gewinnen. Berechnung und Simulation schießen dazu aufgrund schwer kalkulierbarer und teilweise unerforschter Randbedingungen aber vor allem auch wegen dem ungünstigen Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen aus. Stattdessen wurden einfache, orientierende Versuche durchgeführt.

Für die Analyse von Staubsaugern hinsichtlich Staub- und Fadenaufnahme von Teppichböden existiert ein nach DIN EN 60312 genormtes Versuchsdesign. Dieses wurde für die orientierenden Versuche so weit als möglich übernommen¹. Um eine Aussage zu gewinnen, ob Zahl und Geometrie der Kanäle einen Einfluss auf das Saugergebnis haben können, wurden einfachste Aluminiummodelle gefertigt, die sich an dem Saugrohr eines handelsüblichen Staubsaugers befestigen ließen. Das Spektrum reichte von dem natürlichen Vorbild relativ stark ähnelnden Alternativen bis hin zu durch Variationstechniken „un-kenntlich verfremdeten“ (vgl. Abbildung 6-4). Da nur relative Aussagen von Interesse waren, wurden sämtliche Kanalformen mit einem Referenzmodell, das, wie bei konventionellen Staubsaugern üblich, nur einen Kanal aufwies, verglichen (vgl. Abbildung 6-4, Modell 4). Die Modelle 1 und 2 (Bild 1) erbrachten die mit Abstand beste Staubaufnahme.

¹ Tatsächlich zeigte sich bei der Zusammenarbeit mit einem Hersteller für Bodenstaubsauger im Anschluss an die beschriebene Studienarbeit, dass geringste Abweichungen im Versuchsaufbau einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Da im beschriebenen Versuch weder ein sog. Normteppich noch Normstaub zur Anwendung kamen, sondern lediglich ein augenscheinlich ähnlicher, handelsüblicher Teppich und Strahlmittel verschiedener Granularität, sind die im Versuch ermittelten Ergebnisse innerhalb des Untersuchungsrahmens zwar korrekt (relative Aussage), aber zumindest quantitativ nicht verallgemeinerbar.

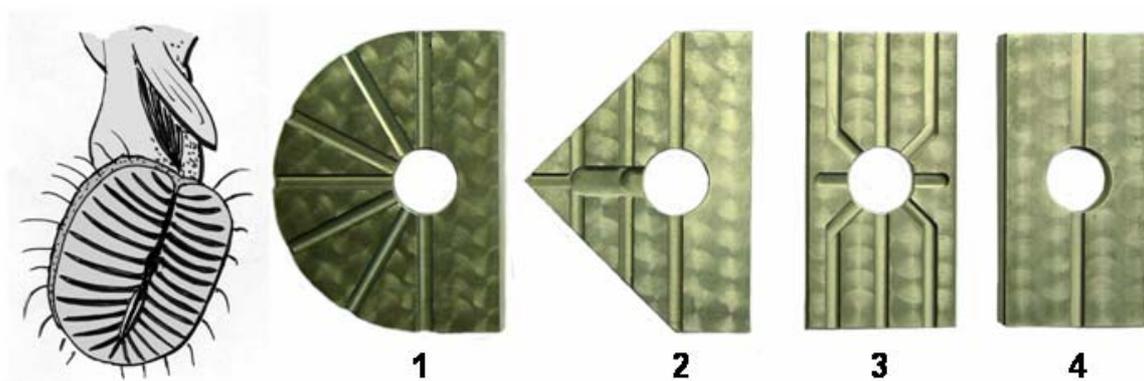


Abbildung 6-4: Kanalstruktur des Fliegenrüssels (links), abgeleitete Modelle (1-3), Referenzmodell (4).

Für die Überprüfung der Anordnungs- und Gestaltvarianten von Zähnen auf Katzen- und Schneckenzungen wurde ein deutlich hochskaliertes, variables Modell angefertigt (Abbildung 6-5, links). Die einschiebbaren Zähne waren mittels Laserschneidverfahren aus Aluminiumblech gefertigt worden. Diese Zähne konnten auf einer Grundplatte mittels Zwischenstücken zu nahezu beliebigen Anordnungen gruppiert werden. Es zeigte sich bei allen Zahnformen und –anordnungen eine nach DIN EN 60312 vollständige Entfernung aller Fasern. Dieser Umstand dürfte vor allem der im Vergleich zu üblichen, bürstenartigen Systemen deutlich höheren mechanischen Steifigkeit zu verdanken sein. Konventionelle Fadenheber erreichten bei den identischen Randbedingungen nur einen Reinigungsgrad von ca. 80%. Es war völlig ausreichend, eine deutlich „entschärfte“ Zahnform zu verwenden (Abbildung 6-5, Mitte) – die anderen Zahnformen hätten vermutlich zu einer Beschädigung des Teppichs geführt.

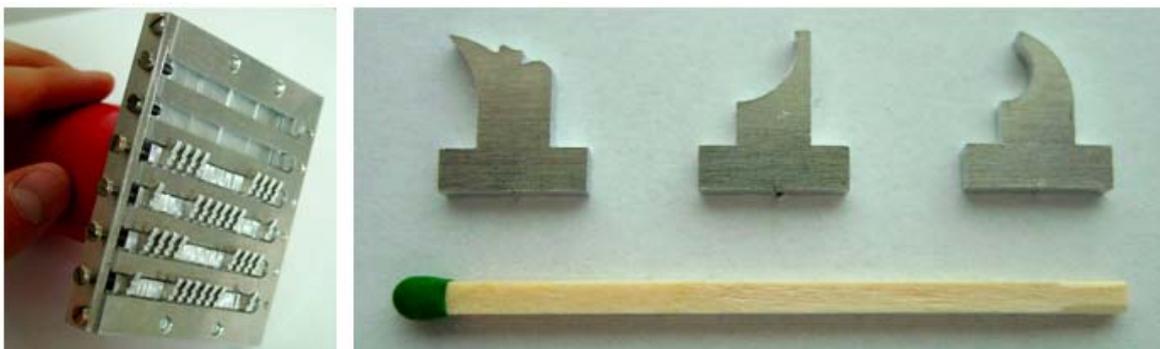


Abbildung 6-5: Modell für Zahnanordnungen (links) und Zahnformen (rechts).

Beide Ansätze – die Kanalstruktur 2 in Abbildung 6-4 und die Zahnform aus Abbildung 6-5, Mitte – wurden in einem Prototypen vereint. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Ressourcen musste auf widerstandsoptimierte Kanalformen der Düse weitgehend verzichtet werden. Die Zähne wurden als Kunststoffteile gefertigt (vgl. Abbildung 6-6).



Abbildung 6-6: Prototyp.

In einem abschließenden Versuch wurde der Prototyp mit einer handelsüblichen Staubsaugerdüse verglichen. Mit dem Prototyp ließ sich ca. 20% mehr Schmutz aus dem Teppich entfernen als mit der handelsüblichen Düse. Es ist zu erwarten, dass sich durch eine strömungstechnische Optimierung der Kanalstrukturen, sowie des nachfolgenden Rohr- und Schlauchsystems die Reinigungsleistung noch steigern ließe.

Bei dem Fallsbeispiel handelte es sich rückblickend um eine Aufgabenstellung, für die sich die Suche nach interessanten biologischen Vorbildern für technische Funktionen vergleichsweise einfach gestaltete. „Staub saugen“ und der Bereich Ernährung in der Biologie ähneln sich in ihrer abstrakten Zielsetzung, nämlich der Aufnahme von Stoffen, relativ stark. Entscheidende Punkte im Prozess lagen dementsprechend nicht bei der Suche geeigneter Vorlagen, sondern vielmehr bei der Informationsgewinnung. Aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen in Biologie und Technik war es notwendig, diese durch orientierende Versuche zu erheben. Ebenfalls signifikant ist die Abstraktion der Vorlagen. „Werkstoffe“, Geometrien und Randbedingungen im Einsatz von Fliegenrüsseln und Schneckenzungen unterscheiden sich relativ stark von den technischen Analogien (siehe Abbildung 6-4). Hätte man die „Suchstrategie“ nach ZERBST (1987) angewendet, wären diese technischen Interpretationen sehr wahrscheinlich nicht naheliegend gewesen. Die starke Abstraktion der biologischen Vorlagen ist neben der geeigneten Aufgabenstellung mit Sicherheit auch dafür verantwortlich, dass Iterationen im Prozess nur in sehr geringem Maße auftraten.

6.2 Hilfsmittel zur Zuordnung biologischer Systeme zu technischen Suchzielen

In Kapitel 6.1.1 wurde dargestellt, dass das Zuordnen von biologischen Systemen zu technischen Suchzielen die Initialzündung für die Anwendung von Bionik darstellt. Sie stellt aber für den durchschnittlichen Ingenieur eine deutliche Hürde dar, da sie ein solides biologisches Grundwissen erfordert. Es kann nur im Sinne der Arbeitsmethodik sein, eine Hilfestellung für die Überwindung einer derartigen Hürde anzubieten. Literatur, die das Thema Bionik behandelt, liefert hierzu einen mittelbaren Beitrag. HILL (1997) bietet hier das derzeit am weitesten entwickelte Werkzeug (vgl. Kapitel 4.5.3.1).

Prinzipiell scheinen Datenbanken, die den unmittelbaren Zugang zu Information zu potenziellen biologischen Analogien ermöglichen, ein sinnvoller Ansatz zu sein. Genauer betrachtet ergeben sich aber einige Nachteile, die zu einem Scheitern eines solchen Ansatzes führen können: Die Diversifikation in der Natur hat eine fast unüberschaubare Fülle an unterschiedlich spezialisierten Arten, Organen und Organellen in den unterschiedlichsten Organisationsformen hervorgebracht. In der biologischen Fachliteratur schlägt sich diese Fülle nieder. Es ist vor der Betrachtung des Verhältnisses von Aufwand und Nutzen ein utopisches Ziel, diese Informationsfülle über eine Datenbank handhabbar machen zu wollen und aktuell zu halten. Ebenso schwierig dürfte es sein, die Beschreibung der einzelnen dort gespeicherten biologischen Systeme so umfassend zu gestalten, dass alle für eine beliebige technische Umsetzung notwendige Fakten enthalten sind. Es wird also in vielen Fällen ohnehin notwendig sein, ausgehend von der Datenbank weitere Information aus Recherchen und Versuchen zu gewinnen. Es ist vor diesem Hintergrund eine fast logische Konsequenz, dass es sehr viel wirtschaftlicher ist, dem Entwickler ein reines Zugangssystem zu biologischem Wissen zur Verfügung zu stellen. Das Wissen selbst liegt ohnehin in großem Umfang und stets aktualisiert in Form der Fachliteratur vor. Die Datenbank existiert also im Prinzip schon, was fehlt ist der Zugang zu den Daten!

Wie kann ein Zugang zu biologischer Information für den Entwickler aussehen? In der Regel wird der Entwickler eine Vorstellung gewonnen haben, was sein technisches System leisten soll. Letztendlich handelt es sich hierbei um (Soll-) Funktionen. Das Zugangssystem muss also gewährleisten, dass eine Zuordnung biologischer Systeme zu diesen Funktionen erfolgen kann. Ein Zugang über Randbedingungen eines technischen Problems, das in Zusammenhang mit dem bionischen Vorgehensmodell vorgeschlagen wird, muss der freien Assoziationsbildung vorbehalten bleiben – zu groß wäre die Zahl der denkbaren Kombinationen unterschiedlicher Parameter. Die Funktionen leiten zu Begriffen, die als Stichwort eine geeignete Basis für eine Recherche im www und der Fachliteratur bieten. Ein solches Werkzeug – eine Assoziationsliste – soll im Folgenden vorgestellt werden (vgl. Abbildung 6-7).

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
bewegen	bewegen	Flüssigkeiten	Cilien-/Flagellenschlag, Peristaltik, Spucken, Blutgefäße (optimal verzweigtes Röhrentransportsystem), Bewegung der Zellplasmas (Plasmaströmung des Actomyosin-Systems), Wassertransport in Pflanzen
		molekulare und submolekulare Partikel	Bewegung der Zellplasmas (Plasmaströmung des Actomyosin-Systems)
		Partikel	Strömung in Schwämmen, Flimmerepithel
		Feststoffe	Bewegung von Organismen zu Land, Luft, Wasser und unter der Erde, Peristaltik
		strukturierte Stoffe	Bewegung von Organismen zu Land, Luft, Wasser und unter der Erde, Peristaltik
		technische Objekte und Stoffe	
verformen	glätten	Feststoffelemente	Insektenflügel nach dem Schlüpfen aus dem Kokon, Blattentfaltung aus Knospe, Furchung von Kakteen (wasserspeichernde Pflanzen: Sukkulente), Kehlsäcke (Vögel (Aves)), Schwellkörper, Mimik, Putzverhalten (Federn, Fell und Antennen)
	umformen	Feststoffe	Kauwerkzeuge, Kiefer und Zähne, Wachstum, Turgor, Abductin (Muscheln (Bivalvia), vernetztes Polymer), Resilin (Insekten (Hexapoden), vernetztes Polymer), Elastin (Aorta, globuläre Proteinkomplexe), Collagen (Haut, Kontraktion durch Ionen)

Abbildung 6-7: Assoziationsliste (Auszug).

HILL (1997) verwendet bei seinem Werkzeug eine Funktionsklassifizierung, die letztlich auf der Systematik von RODENACKER (1976) beruht. Diese in der Konstruktionsforschung mittlerweile als überholt geltende Klassifizierung ist auf sehr abstraktem Niveau und entspricht der sprachlichen Ausdrucksweise des Anwenders nur in Ausnahmesituationen. Ein Softwaretool zur Unterstützung der Methodik TRIZ (Techoptimizer[®] 3.0 der Fa. Invention Machine[®]) bietet eine sehr umfassende Datenbank für physikalische Effekte und ihre Anwendung. Der Zugang zu den Effekten erfolgt u.a. über mit Objekten, Feldern oder Parametern verknüpften Funktionen (z.B. „produce electric current“). Insgesamt ergeben sich so 203 spezifische Funktionen entgegen der 15¹, welche HILL (1997) anbietet. Das Zugangssystem des Softwaretools zeigte sich in der Vergangenheit bei Entwicklungstätigkeiten in Industrie aber auch Lehre als sehr positiv. Die Zugangssystematik der Assoziationsliste ist daraus abgeleitet. Abgesehen von der Übersetzung aus dem Englischen, wurden an der Zugangssystematik folgende Anpassungen vorgenommen:

- Die Trennung von Funktion und Objekt/Feld/Parameter wurde aufgelöst. Dies erfolgte ausschließlich aus dem Grund, dass es sich bei der Assoziationsliste um eine statische Liste in Papierform handelt - Sortierfunktionen sind hier irrelevant.
- Eine zweite übergeordnete Strukturebene wurde hinzugefügt („FKT I“ und „FKT II“). Sie fasst begrifflich nah verwandte erscheinende Funktionen zu einer Gruppe zusammen. Die übergeordnete Strukturebene soll lediglich einen effizienteren Zugang zu relevanten Funktionen ermöglichen, sie setzt ihre Verwendung aber nicht voraus.

¹ 15 ist eine theoretische Zahl. Sie ergibt sich aus drei Umsatzarten (Stoff, Energie, Information) und fünf „Grundfunktionen“ (Verbinden/Trennen, Speichern/Sperren, Übertragen, Stützen/Tragen, Formen). HILL (1997) nutzt für seine Kataloge lediglich neun der 15 denkbaren Kombinationen.

- Begrifflich identisch erscheinende Funktionen wurden zusammengefasst, ebenso wie funktionale Differenzierungen, die der Reversibilität biologischer Systeme nicht entsprechen (increase and decrease parameter). Die Zahl der Funktionen reduziert sich so von ursprünglich 203 auf 177.

Die technischen Funktionen verschaffen Zugang zu assoziierten Begriffen, die Bezeichnungen von Lebewesen (Gruppen), Organen und Organellen darstellen. Mit diesen Begriffen lassen sich Stichwortsuchen in der Fachliteratur und im Internet unternehmen. Um den Zugang zu Fachliteratur und vor allem auch zu Fachbeiträgen im Internet zu verbessern, sind für die assoziierten Systeme neben den Trivialbezeichnungen auch die wissenschaftlichen Bezeichnungen angegeben. Die wissenschaftlichen Bezeichnungen verringern den Umfang der irrelevanten Suchergebnisse der Stichwortsuche im Internet deutlich, schließen aber gleichzeitig Beiträge in Fremdsprachen mit ein, da die wissenschaftlichen Bezeichnungen lateinischen und griechischen Ursprungs sind. So ergibt z.B. eine Suche mit dem Begriff „Nilpferd“ mit der Suchmaschine Google (www.google.de) 13.800 Treffer im deutschsprachigen Netz (an erster Stelle eine Schülerzeitung mit dem Namen Nilpferd), während sie mit dem Begriff „Hippopotamus“ nurmehr 968 Treffer ergibt (23.08.2003).

Die Einträge in der Assoziationsliste wurden basierend auf meinem persönlichen Grundwissen und einigen biologischen Standardwerken erstellt. Es wäre vermessen davon auszugehen, dass die Liste in irgendeiner Form vollständig wäre. Ist erstmals ein Zugang zu Fachliteratur geschaffen, finden sich dort in der Regel auch noch weitere interessante Systeme. Die Assoziationsliste ist demzufolge als einfaches lebendes Instrument zu verstehen, das erweitert und ggf. auch umstrukturiert werden kann. Sie befindet sich in ihrer aktuellen Form im Anhang.

6.3 Zusammenfassung

In Kapitel 6 wurden ein Vorgehensmodell für die Lösungssuche mittels Bionik, ein Vorschlag zur Methodenintegration und ein Hilfsmittel für die Zuordnung biologischer Systeme zu technischen Funktionen vorgestellt.

Das bionische Vorgehensmodell ist am natürlichen zyklischen Vorgehen orientiert. Es basiert auf der Beobachtung und Anpassung des Vorgehens der in Kapitel 4.5.3.2 genannten Fallstudien. Abstrakt betrachtet handelt es sich um eine Suchstrategie, die sich auf andere Themengebiete übertragen lässt. Sucht man z.B. Analogien im Bereich der Technik, kann das Vorgehensmodell in seiner Struktur prinzipiell ebenso angewendet werden. Das Modell fördert in seiner expliziten Anwendung die Reflexion und damit Bewertung der getätigten Schritte. Es drängt den Anwender so zu einer intensiveren Auseinandersetzung mit der Planung seines weiteren Vorgehens und vermindert durch seine zyklische Struktur die Gefahr, eine Suche zu früh ergebnislos aufzugeben. Es unterscheidet sich in seiner

Zielsetzung sehr deutlich von dem von ZERBST (1987) vertretenen Modell einer Suchstrategie (vgl. Kapitel 4.5.3.1), die den Schwerpunkt auf die physikalisch basierte Überprüfung der Übertragbarkeit legt. Die Fokussierung der Übertragbarkeit impliziert ein „Kopieren“ natürlicher Systeme. Dies wird aufgrund deutlich unterschiedlicher Randbedingungen in Natur und Technik nur in sehr wenigen Fällen möglich sein. Darüber hinaus ist der um einiges wertvollere Weg versperrt, sich von natürlichen Systemen inspirieren zu lassen und Lösungsansätze aus einer abstrakten Betrachtung dieser Systeme zu gewinnen. Das Fallbeispiel in Kapitel 6.1.2 zeigt, dass gerade durch die Abstraktion natürlicher Systeme sehr innovative Lösungsansätze resultieren können. Das vorgestellte Vorgehensmodell setzt gerade durch seine gezielten Fragen und den zyklischen Charakter an den o.g. Nachteilen des Modells nach ZERBST (1987) an.

In einem Schritt des Vorgehensmodells wird die Formulierung eines Suchziels gefordert. Abstrahiert man diesen Schritt, handelt es sich schlicht um eine Zielformulierung. Den Ergebnissen aus Kapitel 3.4 entsprechend, ist diese besser objektorientiert zu formulieren, da so internes Wissen einfacher abgerufen werden kann. Weiter wird zwischen einer Assoziation auf Basis von Randbedingungen und Zielsetzungen differenziert. Die Art und Weise, wie in diesem Fall Suchziele formuliert werden, ist übertragbar auf jegliche Art von (Lösungs-) Suche.

Des Weiteren werden Strategien für die Zuordnung biologischer Systeme zu technischen Funktionen beschrieben. Diese reichen von methodischen Empfehlungen bis zu eher organisatorischen. Tatsächlich stellt die Zuordnung biologischer Systeme den „Flaschenhals“ bei der Anwendung von Bionik dar. Auch unabhängig von Bionik sind gezielte Zuordnungen nicht allzu leicht zu erzeugen. Durch den interdisziplinären Charakter der Bionik wird sich diese Schwierigkeit für den durchschnittlichen Entwickler sogar noch stärker bemerkbar machen.

In der Regel werden sich biologische Vorbilder nicht 1:1 in ein technisches System übersetzen lassen. Es wäre reichlich vermessen, den mehrere Milliarden Jahre dauernden evolutionären Fortschritt der Natur in einem Handstreich technisch einstellen zu wollen. Es wird hier also notwendig sein, die Vorlage auf abstrakterem Niveau zu betrachten, letztlich also die Wirkprinzipien der betrachteten Systeme zu verstehen oder zumindest Hypothesen hierfür zu bilden. Iterative Ansätze, wie die progressive Abstraktion (SCHLICKSUPP 1989) sind hier sicherlich hilfreich (siehe auch Kapitel 4.3). Oftmals werden für die technische Entwicklung notwendige Informationen nicht aus der Literatur der Biologie ableitbar sein. Zielsetzungen in Technik und Forschung seitens der Biologie sind dazu häufig zu gegensätzlich. Hier hat sich der Einsatz einfacher, orientierender Versuche bewährt. Einige Strategien, wie man hier Aufwände reduzieren kann, werden ebenfalls dargelegt.

Wie oben angesprochen, stellt die Zuordnung biologischer Systeme zu technisch Suchzielen eine gewisse Schwierigkeit dar. Es ist für den Methodiker verlockend, hierzu eine Da-

tenbank als Hilfsmittel anzubieten. Betrachtet man das Informationsangebot der Biologie quantitativ und qualitativ, wird man von diesem Vorhaben eher Abstand nehmen müssen. Zum einen sieht man sich einer Datenfülle gegenüber, zum anderen sind die Informationen nicht adäquat für die Technik aufbereitet. Der Aufwand, eine derartige Datenbank zu erstellen, dürfte leicht im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs liegen. Ob der Nutzen in einem entsprechenden Verhältnis steht, darf indes bezweifelt werden. Demzufolge wird hier auch entgegen des in Kapitel 4.5.3.1 beschriebenen Ansatzes nach HILL (1997) ein anderer Weg gewählt: Dem Anwender wird eine Liste mit Assoziationen zur Verfügung gestellt. Diese nimmt es dem Anwender nicht ab, Informationen zu gewinnen und zu verarbeiten. Sie erleichtert dem Anwender aber entscheidend den Zugang zu Information durch das Angebot fachspezifischer Suchbegriffe.

Es ist generell die Frage, ob eine derartige Form des „Wissensmanagements“ nicht in vielen Fällen der wirtschaftlichere Ansatz ist: Man lässt das „Wissen“ wo es ist, und erleichtert lediglich den Zugang dazu. Im Bereich des industriellen Wissensmanagements existieren analoge Ansätze. So betreiben manche Firmen keine aufwändigen „Wissensdatenbanken“, sondern bieten vereinfacht gesagt eine Telefonliste mit zu spezifischen Themen kompetenten Ansprechpartnern samt „Sprechstunden“ an. Die weiterführenden Fragestellungen, wann derartige Systeme zu bevorzugen sind und wie sie im Detail am besten zu gestalten sind, bieten sicherlich noch einigen Raum für weitere Forschungstätigkeiten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Wie steigern ich Kreativität? Wie erziele ich bei der Konzeptionierung bessere Ergebnisse und wie kann ich dabei die Effizienz steigern? Diese Fragen sind alles andere als neu. Sie gehören sicherlich zu den Grundintentionen der Konstruktionsforschung. Gleichwohl drängt sich bei der Anwendung von Methodik bisweilen der Eindruck auf, dass die Antworten auf diese Fragen teilweise noch recht weit davon entfernt sind, vollständig und korrekt zu sein. Es wäre ohne Zweifel anmaßend zu behaupten, man könne obige Fragen einfach beantworten. Immerhin zeigt sich, dass auch heute noch durch das Einnehmen einer anderen Perspektive und mit einer Portion Skepsis Aspekte zu Tage treten, die der Beantwortung der obigen Fragen zumindest dienlich sind.

Die Perspektive, welche einzunehmen der Leser animiert wird, basiert auf einer Betrachtung des Aufbaus und der Funktionsweise des menschlichen Gedächtnisses (Kapitel 3). Unser Gedächtnis ist letztlich der „Ort“, an dem wir Lösungen für Probleme erarbeiten. Die Kognitive Psychologie hat eine sehr große Zahl an Modellen erarbeitet, die Aspekte unseres Gedächtnisses beschreiben. Diese Modelle können zwar noch nicht erklären wie unser Gedächtnis in seiner Gesamtheit funktioniert, sie beinhalten aber Erkenntnisse, die für die Konstruktionsforschung von Nutzen sein können.

Klassisches und in der Konstruktionsforschung auch verbreitetes Gedächtnismodell ist ein Mehrspeichermodell, bestehend aus einem sensorischen Register, dem Kurzzeitgedächtnis und dem Langzeitgedächtnis. Gerade der Aufbau des Kurzzeitgedächtnisses in diesem Modell bestätigt einige elementare Empfehlungen der Konstruktionsmethodik: Dieser Speicher ist in seiner Kapazität sehr beschränkt. Dies drückt sich im Alltag darin aus, dass wir unsere Aufmerksamkeit nur einer sehr begrenzten Anzahl an Gesichtspunkten zuwenden können. Angesichts der Komplexität unseres Umfeldes ist die Strukturierung von Information zwingend notwendig, um sie handhabbar zu machen. Die Strukturierung erfordert die Abstraktion von Information. Dabei ist es deutlich einfacher, Information zu konkretisieren als sie zu abstrahieren – viele Methoden setzen deshalb an diesem Punkt an.

Sobald wir etwas abstrahieren – also einen Oberbegriff suchen oder bilden – kommt unser Langzeitgedächtnis ins Spiel: Wir rufen Information aus diesem ab. Es entzieht sich uns weit mehr als das Kurzzeitgedächtnis. Das Langzeitgedächtnis ist uns nicht bewusst, wir werden Teilen seines Inhalts nur dann gewahr, wenn wir sie abrufen. Ein Modell, das den

assoziativen Abruf von Information sehr anschaulich beschreibt, ist das Aktivationsausbreitungsmodell. Es basiert auf der Annahme, dass Information in einem semantischen Netzwerk gespeichert sind. Wird ein Knoten (Begriff) dieses Netzes aktiviert, breitet sich diese Aktivierung über das Netz aus. Dabei erfährt die Aktivierung eine Dämpfung. Das Modell unterstreicht, dass, wenn wir interne Information aus unserem Gedächtnis gewinnen wollen, wiederum die Abstraktheit von Begriffen eine zentrale Rolle spielt. Eine weitere Eigenheit von Abrufprozessen des Langzeitgedächtnisses ist, dass sich Zusammenhänge von Objekten weit schwerer abrufen lassen als Objekte selbst. Dementsprechend ist die Bildung von Analogien kein trivialer Prozess, obgleich ohne Zweifel wichtiges Element der Lösungssuche.

In der kognitiven Psychologie haben sich Modelle des Arbeitsgedächtnisses etabliert. Diese bieten in ihrer teilweise etwas unschärferen Struktur eine bessere Grundlage, um Prozesse beim Lösen von Problemen zu erklären, als das o.g. Mehrspeichermodell. Das Arbeitsgedächtnis ist der Bereich unserer persönlichen Gegenwart. In dieses laden wir Information von außen und aus unserem Langzeitgedächtnis. Das Arbeitsgedächtnis ist der Ort, an dem wir Information verknüpfen und bewerten. Es beinhaltet ein Modell eines Problems mit dem wir uns gerade beschäftigen, sowie die Ansätze, die wir für seine Lösung bilden. Wir beschäftigen uns nie mit dem Problem an sich, sondern lediglich mit unserer persönlichen Wahrnehmung von ihm. Diesem Modell kommt deshalb eine zentrale Rolle für die Qualität der Lösungen zu, die wir erarbeiten. Beschreibt unser Problemmodell das reale Problem nur unzureichend, werden Lösungen in der Realität entsprechend auch unzureichend sein. Ob die Tragweite dieses Zusammenhangs in der Konstruktionsforschung (ganz im Gegensatz zur kognitiven Psychologie) bekannt ist, darf indes bezweifelt werden.

Betrachtet man Methodik vor dem Hintergrund der hier nur auszugsweise dargestellten Erkenntnisse über die Funktionsweise unseres Gedächtnisses, bietet sich ein sehr heterogenes Bild (Kapitel 4). Ausgehend von Modellen des Arbeitsgedächtnisses wird eine etwas unkonventionelle Einteilung von Methoden unternommen, die der Bildung von Lösungsalternativen dienen:

Aufgrund der intensiven Verzahnung von Analyse und Synthese, vor allem aber aufgrund der Rolle von Problemmodellen für die Lösungssuche sind Methoden zur Problemmodellierung ein wichtiger aber noch unterbewerteter Bestandteil der Methodik. Von der aus dem deutschsprachigen Raum stammenden Methodik wird der Entwickler bei der Bildung von Problemmodellen, abgesehen von Anforderungslisten und Funktionsstrukturen, schlicht allein gelassen. Auch andere Schulen, wie das Systems Engineering und TRIZ betonen lediglich Teilaspekte eines vollständigen Problemmodells. Der zweifelsohne wichtige didaktische Wert solcher Methoden – vor allem der Funktionsstrukturen – soll hier nicht in Abrede gestellt werden. Ob sie allerdings als operative Methoden ein sinnvolles Verhältnis von Aufwand und Nutzen aufweisen, muss bezweifelt werden.

Methoden, die Problemmodellierung und die Entwicklung von Lösungsansätzen sehr stark miteinander verbinden, werden in dieser Arbeit als dialektische Methoden bezeichnet. Obwohl man ihnen vor dem Hintergrund der Gedächtnismodelle ein großes Potenzial zuschreiben muss, genießen sie innerhalb der Konstruktionsforschung kaum Popularität. Dies ist umso verwunderlicher, als dass es sich im Gegensatz zu manchen konstruktionsmethodischen Konstrukten um sehr wirtschaftliche Methoden handelt. Die Unterstellung drängt sich förmlich auf, dass diese Methoden weniger wegen mangelnder Qualität unpopulär sind, als vielmehr aufgrund ihrer Widersprüchlichkeit zu etablierten, Problemmodellierung und die Entwicklung von Lösungsansätzen trennenden Vorgehensmodellen der Konstruktionsforschung.

Der dritte Bereich von Methoden zur Lösungssuche, die überwiegend die reine Entwicklung von Lösungsansätzen fördern, wird in Anlehnung an Modelle des Arbeitsgedächtnisses in dieser Arbeit in Kreativitätstechniken und externe Information zu integrierende Methoden unterteilt. Kreativitätstechniken - allen voran das Brainstorming - genießen eine sehr große Popularität. Ohne Zweifel existieren Randbedingungen, bei denen der Einsatz eines Brainstormings berechtigt und zielführend ist. Erfahrungen im praktischen Einsatz dieser Methode, Forschungsergebnisse der Psychologie, die die generelle Unwirksamkeit dieser Methode nachweisen und eine Bewertung vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnisse deuten allerdings darauf hin, dass diese Methode weithin völlig überschätzt wird. Gerade die etwas unpopuläreren Kreativitätstechniken wie etwa Reizwortanalyse und Synektik, deren Wirkweise sich gerade anhand des Aktivationsausbreitungsmodells gut nachvollziehen lässt, scheinen hier sehr viel besser geeignet zu sein.

Methoden, die die Integration externer Information für die Synthese unterstützen, sind in vielfältigen Formen entstanden. Information kann hier in sehr abstrakter Form, etwa als Prinzip vorliegen (TRIZ), kann aber auch sehr konkret sein (Konstruktionskataloge). Beide Extreme bieten Vorteile, aber auch Nachteile. Ist die Information sehr abstrakt gehalten, kann sie zwar sehr stark zur Assoziationsbildung anregen, sie hat aber möglicherweise in einigen Fällen zu wenig Inhalt, um dem Anwender zu nutzen. Ist Information sehr konkret, kann der Anwender sie vielleicht besser verarbeiten, sie führt aber auch leicht zu Fixierungen, da ihre Abstraktion durch den Anwender meist nicht gefördert wird. Wo hier Optima liegen ist sicherlich sehr stark von den Randbedingungen der Methodenanwendung abhängig.

Einer Methode zur Integration externer Information wird in diesem Rahmen besonderes Augenmerk geschenkt – der Bionik. Bionik ist vergleichsweise populär. Sie betitelt zahlreiche Ausstellungen, Berichte in den Medien und einige Fachbücher. Sie stellt trotz ihres relativ jungen Namens auch mit Sicherheit eine der ältesten Methoden der Menschheit dar. Dennoch wird sie kaum eingesetzt. Fallstudien im Rahmen von Studienarbeiten haben deutlich gezeigt, woran dies liegen kann: Technik und Biologie haben sich aufgrund des enormen Wissenszuwachses und der damit verbundenen Spezialisierung sehr stark ent-

fremdet. Heute liegt eine Kluft zwischen diesen Disziplinen, die für Techniker ohne solides biologisches Grundwissen nur schwer zu überschreiten ist. Die Ergebnisse einiger Studienarbeiten haben aber auch gezeigt, dass es durchaus Wert sein kann, diese Kluft zu überschreiten. Probleme der Bionik als angewandte Methode basieren folglich auf einem Kommunikationsproblem. Es ist vergleichsweise erstaunlich, dass trotz dieser für die Konstruktionsforschung eigentlich klassischen Problemstellung, bislang kaum Methoden existieren.

Die Betrachtung ausgewählter Methoden in dieser Arbeit zeigt einige „weiße Flecken“ auf der Methodenlandkarte. Bereiche, die in Folge weiter vertieft werden, sind die Bildung von Problemmodellen und die Entwicklung von Hilfestellungen für die Bionik. Wie weiter oben erläutert, unterstützen bestehende Methoden lediglich die Bildung von Teilaspekten eines Problemmodells. Während qualitative Zusammenhänge noch vergleichsweise gut abgebildet werden, bleiben quantitative Zusammenhänge meist unberücksichtigt. Reale Probleme in der Produktentwicklung haben aber auch stets eine quantitative Komponente. In Entwicklungsprojekten in Zusammenarbeit mit der Industrie hat sich gezeigt, dass das Bilden physikalischer Problemmodelle ein hervorragendes Instrument ist, Ergebnisgüte und Effizienz des Entwicklungsprozesses zu steigern (Kapitel 5). Ein physikalisches Modell erlaubt, das Verhalten eines technischen Systems auf Änderungen zu beurteilen. Diese „Handlungsvorwegnahme“ ist genau das, was wir in unserem Arbeitsgedächtnis tun, wenn wir Lösungen erarbeiten. Physikalische Zusammenhänge zeigen oft unmittelbar, an welchen Stellrädern man drehen muss, um die größte Wirkung für die Problemlösung zu erzielen. Sie ermöglichen es schon sehr früh im Entwicklungsprozess, Nicht-Lösungen von Lösungen zu unterscheiden. Physikalische Problemmodelle bieten die Möglichkeit, das Lösungsfeld aufzuweiten und gleichzeitig auf besonders Erfolg versprechende Bereiche zu fokussieren. Das Bilden physikalischer Modelle ist Hauptbestandteil des Ingenieurstudiums. Es gilt, diese gute Grundlage lediglich auch in der Praxis entsprechend zu nutzen. Auf Akzeptanzprobleme wird man mit dieser Vorgehensweise in der Industrie wohl kaum stoßen. Einschränkend ist zu bemerken, dass sich nicht alle technischen Probleme physikalisch beschreiben lassen. Dementsprechend die Bildung physikalischer Modelle als Ergänzung zu bestehenden Methoden, nicht als deren Ersatz zu verstehen.

Anhand der Analyse bestehender Methoden für die Lösungssuche wurde für die Bionik ein Potenzial identifiziert, dessen Nutzung aber methodische Hilfestellungen erfordert, die bislang noch nicht in befriedigender Form existieren. In Kapitel 6 wird ein Vorgehensmodell beschrieben, das die Anwendung von Bionik für Techniker unterstützen soll. Es handelt sich um eine iterative Suchstrategie, die das Auffinden von Analogien in der Natur unterstützt. Sie fördert die Reflexion und Bewertung eigenen Vorgehens und ermöglicht so eine situativ angepasste Annäherung an potenzielle Analogien. Information über biologische Systeme liegen selten in der Form vor, dass sich die Übertragungsmöglichkeit auf technische Systeme daraus erschließen ließe. In diesem Zusammenhang haben sich einfa-

che orientierende Versuche als sehr nützliches Hilfsmittel erwiesen. Wie die orientierenden Versuche lassen sich noch weitere Methoden in dieses Vorgehensmodell integrieren. Eine Empfehlung für ihre Anwendung – insbesondere das Formulieren von Suchzielen – wird auf Basis von Erfahrungen in konkreten Entwicklungsprozessen und den Betrachtungen in Kapitel 3 getroffen.

Das bionische Vorgehensmodell wird um ein Hilfsmittel zur Zuordnung biologischer Systeme zu technischen Funktionen erweitert („Assoziationsliste“). Dabei handelt es sich um eine Liste von Suchbegriffen. Der Zugang zu diesen Begriffen erfolgt über technische Funktionen. Diese Form, Zugang zu Information zu verschaffen, hebt sich etwas von etablierten, auf Datenbanken basierenden Wissensmanagementsystemen ab. Die Daten sind in Form der Literatur der Biologie und im Internet in sehr großer Menge vorhanden. Allein der Zugang dazu ist schwierig. Die angebotene Assoziationsliste setzt genau an dieser Schwierigkeit an. Sie stellt einen sehr pragmatischen Ansatz dar, der Aufwände von Datenbanken (Erstellung und Pflege) nicht aufweist.

Die methodischen Ansätze für die Lösungssuche mittels Bionik lassen sich in leicht abstrahierter Form auch auf andere Bereiche übertragen. Das Vorgehensmodell zur Analogiesuche lässt sich ohne Probleme auf technische Analogien erweitern. Mechanismen, die für das Formulieren von Suchzielen gelten, lassen sich auch auf allgemeine Zielformulierungen übertragen. Der pragmatische Ansatz der Assoziationsliste ist auch für den Bereich des Wissensmanagements interessant. Es existieren in der Industrie bereits Systeme, die ohne eine Datenbank auskommen: Man verwendet vergleichbar zur Assoziationsliste eine Liste mit den Kompetenzen der Mitarbeiter. Informationen erhält man bei Einhaltung einiger organisatorischer Regelungen von diesen Mitarbeitern direkt.

7.2 Ausblick

Die kritische Betrachtung bestehender Methoden in Kapitel 4 deutet relativ unmittelbar auf weitere denkbare Forschungstätigkeiten hin. Angesichts einiger Veränderungen innerhalb der Konstruktionsforschung scheint es opportun, die unter dem Begriff der dialektischen Methoden subsumierten Ansätze weiterzuentwickeln. Hier scheint durchaus Potenzial zu bestehen.

Hinsichtlich der Bildung von Problemmodellen besteht seitens der Konstruktionsforschung ein enormes Defizit. In dieser Arbeit wird lediglich ein vergleichsweise kleiner Beitrag zur Verringerung dieses Defizits geleistet. Zielführend wäre sicherlich dieses Thema in einem durchaus größeren Rahmen, etwa mit Beteiligung von Kognitionspsychologen zu behandeln. Interessant wäre, den Zusammenhang zwischen der Repräsentation der Problemmodelle, dem realen Problem und dem Problemlösungsprozess empirisch zu untersuchen. Die daraus entstehenden Erkenntnisse könnten zu einem ganzheitlicheren Ansatz führen, als in

dieser Arbeit. Eine Bewertung und Erweiterung der bestehenden Methoden erscheint aber in jedem Fall erstrebenswert.

Bionik als Methode zur Lösungssuche steckt noch in den Kinderschuhen. Fallbeispiele erfolgten bisher noch primär in universitärem Rahmen. Eine Zusammenarbeit mit der Industrie wäre sicherlich erstrebenswert, um vorgestellte methodische Ansätze in Realiter zu erproben und weiterzuentwickeln. Gerade das Hilfsmittel der Assoziationsliste sollte ggf. umstrukturiert und erweitert werden. Auch die effiziente Durchführung orientierender Versuche bei sehr geringen Kenntnisständen scheint in diesem Zusammenhang ein lukratives Forschungsgebiet zu sein. Des Weiteren kann man sich die Frage stellen, ob und wie sich die vorgestellten methodischen Konzepte auch auf andere Bereiche erweitern lassen.

Zu guter letzt sollte man die im Kapitel 2.1 diskutierten Probleme der Forschungsmethodik nicht aus den Augen verlieren: Diese Arbeit ist wie jede andere auch mit einer gesunden Portion Skepsis zu lesen. Verallgemeinerungen in dieser Arbeit basieren zwar auf Beobachtungen, diese müssen aber aus forschungsmethodischen Gesichtspunkten eher als Indizien denn als Beweise gesehen werden. Nur die kritische und praxisorientierte Auseinandersetzung mit methodischen Ansätzen befähigt den Methodiker, der „Wahrheit“ einen Schritt näher zu kommen.

8 Literatur

ALTSCHULLER, G. (1986)

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

AMMER, D. (2002)

Entwicklung eines Werkzeugs für die Endoskopie mittels Bionik.
(Unveröffentlichte Semesterarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2002.

ARNOLD W.; EYSENCK H.J.; MEILI R. (1987)

Lexikon der Psychologie.
Freiburg: Herder, 1987.

ATKINSON, R.C. & SHIFFRIN, R.M. (1968)

Human memory: A proposed system and its control processes.
In: K.W. Spence & J.T. Spence (Eds.), The psychology of learning and motivation (Advances in research and theory Vol. 2, S. 89-195).
New York: Academic Press, 1968.

BADDELEY, A. (1997)

Human memory: Theorie and practice.
East Sussex: Psychology Press, 1997.

BADDELEY, A. (1999)

Essentials of human memory.
East Sussex: Psychology Press, 1999.

BADDELEY, A. (2002)

The concept of episodic memory.
In: A. Baddeley, M. Conway & J. Aggleton (Eds.), Episodic memory: New directions in research (S. 1-10).
Oxford: Oxford University Press, 2002.

BARCLAY, I.; DANN, Z.; HOLROYD, P. (2000)

New Product Development.
Boca Raton: CRC Press, 2000.

BAUER, P. (2003)

Vergleich von skalierten Flagellen mit konventionellen Schiffsantrieben.
(Unveröffentlichte Semesterarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2002.

BERNARD, R. (1999)

Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionsmechanik München, Band 35)
Zugl. München: TU, Diss. 1999.

BIRKHOFFER, H. & KEUTGEN, I. (1999)

Vom Konstruktionskatalog zum agentengestützten Online-Informationssystem.
In: H.J. Franke, T. Krusche & M. Mette (Hrsg.), Konstruktionsmethodik - Quo Vadis?: Symposium des 80. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Roth (S. 43-53).
Aachen: Shaker, 1999.

BOLZ, A. (2002)

Was wo wie lange gespeichert wird.
In: Spektrum der Wissenschaft Spezial: Gedächtnis, S. 21.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 2002.

BRODBECK, K. (1995)

Entscheidung zur Kreativität.
Darmstadt: Wiss. Buchges, 1995.

CLIFFORD, M. (1998)

Case studies in engineering design.
London: Arnold, 1998.

COLLINS, A. M. & LOFTUS, E. F. (1975)

A spreading-activation theory of semantic processing.
Psychologica Review 82, S. 407-428.

CONWAY, M. (1997)

Cognitive Models of Memory.
Sussex: Psychology Press, 1997.

CONWAY, M. (2002)

Sensory-perceptual episodic memory and its context: autobiographical memory.
In: A. Baddeley, M. Conway & J. Aggleton (Eds.), Episodic memory: New directions in research (S. 53-70).
Oxford: Oxford University Press, 2002.

CRAIK, F.I.M. & LOCKHART, R.S. (1972)

Levels of processing: A framework for memory research.
Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior 11, S. 671-684.

CRAIK, F.I.M. & SIMON, E. (1980)

Age differences in memory: The roles of attention and depth of processing.
In: L.W. Poon, J.L. Fozard, L.S. Cermak, D. Arenberg & L.W. Thompson (Eds.), New directions in memory and aging (S. 95-112).
Hillsdale, N.J.: Erlbaum, 1980.

CROSS, N. (2000)

Engineering design methods: Strategies for product design.
Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

DAENZER, W. (2002)

Systems Engineering: Methodik und Praxis.
Zürich: Industrielle Organisation, 2002.

DIN-EN-NORM 60312 (2001)

Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften von Staub- und Wassersaugern für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke.
Berlin: Beuth Verlag, 2001.

DÖRNER, D. (1987)

Problemlösen als Informationsverarbeitung.
Stuttgart: Kohlhammer, 1987.

DÖRNER, D. (1995)

Problemlösen und Gedächtnis.
In: D. Dörner & E. van der Meer (Eds.), Das Gedächtnis: Probleme – Trends – Perspektiven, (S.297-320).
Göttingen: Hofgrefe, 1995.

DÖRNER, D. (1996)

Gedächtnis.
In: D.Dörner & H. Selg (Eds.), Psychologie: Eine Einführung in die Grundlagen und Anwendungsfelder, (S. 161-171).
Stuttgart: Kohlhammer, 1996.

DÖRNER, D. (2001)

Die Logik des Misslingens – strategisches Denken in komplexen Situationen.
Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 2001.

DORN, M. (1998)

Priming Effekts bei unterschiedlich assoziierten Wortpaaren.
Freiburg: Dissertationsschrift, ISSN 0945-800X, 1998.

EHRENSPIEL, K. (1995)

Integrierte Produktentwicklung. (erste Auflage)
München: Hanser, 1995.

EHRENSPIEL, K. (2003)

Integrierte Produktentwicklung. (zweite Auflage)
München: Hanser, 2003.

- ERNZER, M., OBERENDER, C., BIRKHOFFER, H. (2002)
Methods to Support EcoDesign in the Product Development Process.
In: Going Green - Care Innovation 2002. November 25-28, 2002. in Vienna, Austria. CD-Rom.
Paper number: 04.04.
- FAVRE-BULLE, B. (2001)
Information und Zusammenhang: Informationsfluß in Prozessen der Wahrnehmung, des Denkens und der Kommunikation.
Wien: Springer, 2001.
- FRITSCH, A. (2002)
Entwicklung eines innovativen Staubsaugers auf Basis biologischer Vorbilder.
(Unveröffentlichte Diplomarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2002.
- FRANCE, R. (1920)
Die Pflanze als Erfinder.
Stuttgart: Kosmos, 1920.
- FRANKE, H.J. (1999)
In: H.J. Franke, T. Krusche & M. Mette (Hrsg.), Konstruktionsmethodik - Quo Vadis?: Symposium des 80. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Roth, (S. 13-30).
Aachen: Shaker, 1999.
- FURNHAM, A. (2000)
The Brainstorming Myth.
In: Business Strategy Review, Volume 11 Issue 4 S. 21, Dezember 2000.
- GAULL, A. (2003)
Entwicklung eines Systems zur Energierückgewinnung in Haushalt.
(Unveröffentlichte Studienarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2002.
- GRABOWSKI, H. (1997)
Neue Wege zur Produktentwicklung.
Stuttgart: Raabe, 1997.
- GÜNTHER, J. (1998)
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess. Eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30)
Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- HAGENDORF, H. (1995)
Visuell-räumliche Repräsentationen und Gedächtnisleistungen.
In: D. Dörner & E. van der Meer (Eds.), Das Gedächtnis: Probleme – Trends – Perspektiven, (S.169-197).
Göttingen: Hofgrefe, 1995.

- HERB, R. (2000)
TRIZ – der systematische Weg zur Innovation: Werkzeuge, Praxisbeispiele, Schritt – für Schritt – Anleitungen.
Landsberg a. L.: Moderne Industrie, 2000.
- HILL, B. (1997)
Innovationsquelle Natur: Naturorientierte Innovationsstrategie für Entwickler, Konstrukteure und Designer.
Aachen: Shaker, 1997.
- HURST, K. (1999)
Engineering Design Principles.
London: Arnold, 1999.
- HYMAN, B. (1998)
Fundamentals of engineering design.
Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- JAFFARD, R. (2002)
Das facettenreiche Gedächtnis.
In: Spektrum der Wissenschaft Spezial: Gedächtnis, S. 6-9.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 2002.
- KERN, H. (1997)
Einzelfallforschung.
Weinheim: Psychologie Verlags Union, 1997.
- KALETKA, I. (1999)
Zielgerichtetes Entwickeln im Methodischen Konstruktionsprozeß durch Verwendung ganzheitlicher Modelle.
Göttingen: Cuvillier, 1999.
- KLIMESCH, W. (1995)
Gedächtnispsychologische Repräsentationsannahmen und ihre möglichen neuronalen Grundlagen.
In: D. Dörner & E. van der Meer (Eds.), Das Gedächtnis: Probleme – Trends – Perspektiven, (S.3-18).
Göttingen: Hofgrefe, 1995.
- KLIX, F. (1980)
Strukturelle und funktionelle Komponenten des Gedächtnisses.
In: F. Klix & H. Sydow (Eds.), Zur Psychologie des Gedächtnisses (S. 59-80).
Bern: Huber, 1980.
- KRAUSE, W.; SEIDEL, G.; SCHNACK, B.; HEINRICH, F.; KRAUSE, U. (2001)
Ordnungsbildung im Denken mathematisch Hochbegabter: Verkettung von Mikrozuständen.
Abstract zur TeaP 2001 in Regensburg.

- KRAUSE, W.; SOMMERFELD, E.; SCHLEUBNER, C. (1996)
Zur Messung des kognitiven Aufwands im Konstruktionsprozess.
In W. Hacker & P. Sachse (Eds.), Bild und Begriff III: Zur Rolle von Anschauung und Abstraktion im konstruktiven Entwurfsprozeß. (S. 131-166).
Dresden: Technische Universität Dresden, Universitätsverlag, 1996.
- KRAUSE, W.; SOMMERFELD, E.; GUNDLACH, W.; PUCHA, J. (1995)
Kreativität zwischen Psychologie und Technik: Bilder, Begriffe, Analogien, Ideen.
In: Tagungsband zur Vortragsveranstaltung "Ein methodischer Weg zu innovativen Technologien" 29. und 30.06.1995 in Aachen.
- LINDE, H. (1993)
Erfolgreich erfinden: Widerspruchsorientierte Innovationsstrategie für Entwickler und Konstrukteure.
Darmstadt: Hppenstedt, 1993.
- LINDEMANN, U. (2001)
Produktentwicklung und Konstruktion. Skriptum zur Vorlesung.
München: Eigenverlag, 2001.
- LINDEMANN, U. (2003A)
Human Behaviour in Design: Individuals, Teams, Tools.
Berlin: Springer, 2003.
- LINDEMANN, U. (2003B)
Methods Are Networks Of Methods.
In: Proc. of the 14th Intern. Conf. on Engineering Design 2003 (ICED 03).
Stockholm (Sweden), 2003.
- MAGRAB, E. (1997)
Integrated product and process design and development: the product realization process.
Boca Raton: CRC Press, 1997.
- MARKMAN, A. (1999)
Knowledge Representation
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 1999.
- MAYER, B. (2003)
Skriptum Kreativitätstechniken der FH-Vorarlberg.
Dornbirn: Eigenverlag, 2003.
- MICHALEWICZ, Z. & FOGEL, B. (2002)
How to Solve It: Modern Heuristics.
Berlin, Heidelberg: Springer, 2002.

- MÖBNANG, A. (2003)
Entwicklung eines osmotischen Aktors.
(Unveröffentlichte Semesterarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2003.
- NACHTIGALL, W. (1998)
Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler.
Berlin: Springer 1998.
- NOPPER, J. (2003)
Technische Umsetzung einer biologischen Strategie zur Energiespeicherung: Thermische Zonung.
(Unveröffentlichte Semesterarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2003.
- NORMAN, D.A. & SHALLICE, T. (1986)
Attention to action: Willed and control of behavior.
In: R.J. Davidson, G.E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), Consciousness and self-regulation. Advances in research and theory, Vol. 4 (S. 1-18)
New York: Plenum Press, 1986.
- OTTO, K.; WOOD, K. (2001)
Product design.
Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001.
- PAHL, G. & BEITZ, W. (2003)
Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und anwendungen.
Berlin: Springer 2003.
- PECQUET, N. (2003)
Entwicklung miniaturisierter Strukturverbände relativbewegungsfreier Fluidaktoren zur Erzeugung dreidimensionaler Bewegung.
(Unveröffentlichte Semesterarbeit)
TU-München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2003.
- PIOLINO, P.; DESGRANGES, B. & EUSTACHE F. (2002)
Wenn die Vergangenheit verschwindet.
In: Spektrum der Wissenschaft Spezial: Gedächtnis, S. 70-75.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 2002.
- PRECHTL, P. (1999)
Metzler-Philosophie-Wörterbuch: Begriffe und Definitionen.
Stuttgart: Metzler, 1999.

PULM, U.; LINDEMANN, U. (2001)

Enhanced systematics for functional product structuring. In: Culley, S.; Duffy, A.; McMahon, C.; Wallace, K. (Eds.): Proc. of the 13th Intern. Conference on Engineering Design 2001, Vol. „Design Research – Theories, Methodologies, and Product Modelling“, Glasgow (UK), 21. 23.08.2001. Glasgow: I Mech E 2001, pp. 477 484. (Schriftenreihe WDK 28)

RECHENBERG, I. (1973)

Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution.
Stuttgart: Frommann, 1973.

RINDFLEISCH, H.J. (1994)

Erfinderschulen in der DDR: eine Initiative zur Erschließung und Nutzung von technisch-ökonomischen Kreativitätspotenzialen in der Industrieforschung; Rückblick und Ausblick.
Berlin: Trafo, 1994.

RODENACKER, W. (1976)

Methodisches Konstruieren.
Berlin: Springer, 1976.

ROSEMANN, B.; MEERKAMM, H. (2002)

Der sanfte Sauger mit IPPsilon-Faktor.
Rhombos-Verlag Müllmagazin Ausgabe 2/2002 / 11 (4).

ROTH, K. (2001)

Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band II
Berlin: Springer, 2001.

RUTZ, A. (1985)

Konstruieren als gedanklicher Prozess.
München: TU-Diss, 1985.

SANDER, S. (2001)

Konzept einer digitalen Lösungsbibliothek für die integrierte Produktentwicklung.
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 342.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

SAPOLSKY, R. (2003)

"Geziefer im Gehirn" In: Spektrum der Wissenschaft Ausgabe Mai S. 98-101.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, 2003

SAVRANSKY, S. (2000)

Engineering of creativity.
Boca Raton: CRC Press, 2000.

- SCHERMER, F. J. (1998)
Lernen und Gedächtnis.
Stuttgart; Berlin; Köln: Kohlhammer, 1998.
- SCHLICKSUPP, H. (1989)
Innovation, Kreativität und Ideenfindung.
Würzburg: Vogel, 1989.
- SIKORA, J. (2001)
Handbuch der Kreativ-Methoden.
Bad Honnef: Katholisch-Soziales Institut der Erzdiözese Köln, 2001.
- STOLL, H. (1999)
Product Design Methods an Practices.
New York: Marcel Dekker, 1999.
- STROEBE, W. & NIJSTAD, B. (2003)
Störe meine Kreise nicht!
In: Spektrum der Wissenschaft Gehirn & Geist, Heft 2/2003, S.26-31.
Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 2003.
- TERNINKO, J. (1998)
Systematic Innovation: an introduction to TRIZ.
Boca Raton: St. Lucie Pr., 1998.
- ULRICH, W. (1975)
Kreativitätsförderung in der Unternehmung, Ansatzpunkte eines Gesamtkonzepts.
Bern: Haupt, 1975.
- ULRICH, K.; EPPINGER, S. (1995)
Product Design and Development.
New York: McGraw-Hill, 1995.
- WEHNER, R. & GEHRING, W. (1992)
Zoologie.
Stuttgart: Thieme, 1992.
- WRIGHT, I. (1998)
Design Methods in Engineering and Product Design.
London: McGraw-Hill, 1998.
- WULF, J. (2002)
Elementarmethodische Konzepte zur Optimierung der Lösungssuche im Team.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung, München, Band 50)
Zugl.: München: TU, Diss. 2002.

YONELINAS, A. P. (2002)

Components of episodic memory: the contribution of recollecting and familiarity.

In: A. Baddeley, M. Conway & J. Aggleton (Eds.), *Episodic memory: New directions in research* (S. 31-52).

Oxford: Oxford University Press, 2002.

ZERBST, E. (1987)

Bionik: biologische Funktionsprinzipien und ihre Anwendung.

Stuttgart: Teubner 1987

9 Anhang

Im Folgenden ist die in Kapitel 6.2 besprochene Assoziationsliste dargestellt. Die Größe der Liste machte einen Seitenumbruch notwendig. Deshalb sind einige Funktionsblöcke auf mehrere Seiten verteilt.

An die Assoziationsliste schließt sich eine Zusammenfassung der Inhalte der Studienarbeiten an, die im Rahmen der in Kapitel 4.5.3.2 dargestellten Fallstudie angefertigt wurden.

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
ändern	ändern	Absorption elektromagnetischer Wellen	Pigmentierung der Haut, Photosynthese (Chlorophyll)
		chemische Parameter	in der Natur allgegenwärtig
		Farbe	Farbwechsel der Haut bei Chamäleons (Chamaeleo) und Tintenfischen (Cephalopoda)
		Konzentration geladener Partikel	Biochemisches Potenzial an Zellmembranen
		Konzentration von Defekten	Immunsystem, Heilprozesse
		Konzentration von submolekularen Partikeln	Stoffwechsel an biologischen Membranen, Exo- und Endocytose, Microtubuli, Osmose
		Konzentration (Parameter)	Osmose
		Verformung (Parameter)	Turgorbewegung, Nutationsbewegung, Myofilamente, Wachstum, Turgor, Abductin (Muscheln (Bivalvia), vernetztes Polymer), Resilin (Insekten (Insecta), vernetztes Polymer), Elastin (Aorta, globuläre Proteinkomplexe), Collagen (Haut, Kontraktion durch Ionen)
		Abmessung	Wachstum (Zellteilung)
		Anordnung von Objekten	Kernteilungsspindeln, Peristaltik
		elektrischer Strom	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)
		elektrisches Feld	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)
		elektrische Parameter	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)
		elektrischer Widerstand	

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
ändern	ändern	Parameter von elektromagnetischer Induktion	Lorenzini-Ampullen der Haie (Selachii)
		Parameter von elektromagnetischen Wellen oder Licht	
		Energie eines bewegten Objekts	Muskelarbeit, Segel und Tragflächenkonstruktionen von Pflanzensamen und Tieren, Fibrillen, Extremitäten
		Energie von submolekularen Partikeln	
		Flüssigkeitsstrom	Schließmuskeln, Poren der Zellmembran (Flüssigmosaikmodell), Plasmaströmung in Zellen durch Aktomyosin
		Parameter von Flüssigkeiten	Viskositätsänderung durch Konzentrationsänderungen von Sphäro- und Linear-kolloiden, Blutgerinnung
		Parameter von Kräften, Energie und Momenten	zu und abnehmendes Ansprechen kaskadierter Aktoren (Muskeln und Muskelzellen), Gelenkstellung der Extremitäten von Wirbel- und Gliederfüßlern (Vertebrata und Arthropoda), Verformung der Sproßachse
		Wechselstromfrequenz	
		Frequenzverschiebung von elektromagnetischen Wellen	
		Reibungsparameter	Sekretion (Speichel, Talg, Schleim), Blasenbildung, Haifischhaut (Selachii), Delphinhaut (Zahnwale: Odontoceti)
		Feuchtigkeit	Schleimhäute der Atemwege, Sekretion

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
ändern	ändern	Abbild	Tarnung vor Hintergrund bei Kopffüßlern (Cephalopoda), allgemein Mimese
		Brechungsindex	
		Intensität elektromagnetischer Wellen	elastische Linsen von Wirbeltieren (Vertebrata) und Kopffüßlern (Cephalopoda)
		Lichtstärke	
		Parameter von Interferenzmustern	Insektenaugen (Insecta)
		Lichtausbreitung	Leuchtorgane von spez. Krebsen und Kopffüßlern (Crustacea und Cephalopoda)
		Parameter von magnetischen Feldern	
		Parameter von mechanischen Wellen und Schallwellen	Stimmmodulation
		mechanische Kräfte	zu und abnehmendes Ansprechen kaskadierter Aktoren (Muskeln und Muskelzellen), Gelenkstellung der Extremitäten von Wirbel- und Gliederfüßlern (Vertebrata und Arthropoda), Verformung der Sproßachse
		Drehmoment	zu und abnehmendes Ansprechen kaskadierter Aktoren (Muskeln und Muskelzellen), Gelenkstellung der Extremitäten von Wirbel- und Gliederfüßlern (Vertebrata und Arthropoda), Verformung der Sproßachse

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
ändern	ändern	Parameter von Bewegung und Vibration	zu und abnehmendes Ansprechen kaskadierter Aktoren (Muskeln und Muskelzellen), Gelenkstellung der Extremitäten von Wirbel- und Gliederfüßlern (Vertebrata und Arthropoda), Verformung der Sprißachse
		Parameter von optischen Geräten	elastische Linsen von Wirbeltieren (Vertebrata) und Kopffüßlern (Cephalopoda)
		Eindringtiefe	Pigmentierung der Haut, Horn(haut)bildung,
		Phase von elektromagnetischen Wellen	
		Polarisation von elektromagnetischen Wellen	
		Druck	Osmose (regulierbar), Bombardierkäfer (Brachynus)
		Prozeßparameter	
		Mengenparameter	
		Radioaktivitätsparameter	
		Reflektionskoeffizient	
		Feststoffparameter	Collagen (Haut, Kontraktion durch Ionen), Anordnung von Fasern (z.B, Zellulose bei Pflanzen, Resilin bei Insekten (Insecta), u.v.m.)
		Ansprechzeit	Verschaltung von Neuronen, Schwellenwert für Nervenimpuls
		Stoffdichte	Schwimmblase bei Knochenfischen (Osteichthyes), Walrat des Pottwals (Physeter macrocephalus), Bombardierkäfer (Brachynus)

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
ändern	ändern	Oberflächenparameter	Haut der Tintenfische (Cephalopoda)
		Temperatur	Hecheln (Wasserverdunstung), Schwitzen, Ohren abstellen (afrik. Elefant (<i>Loxodonta africana</i>)), Anpassung des Stoffwechsels, Bombardierkäfer (<i>Brachynus</i>)
		thermische Parameter	Bombardierkäfer (<i>Brachynus</i>), Durchblutungsänderung (z.B. Vertebrata)
		Zuverlässigkeit von Geräten	Reparaturfunktion, extreme Kaskadierung (Muskeln), Wachstum (Zellteilung), Redundanz
		Gewicht	
		Benetzbarkeit	Talgproduktion der Haut, Aufbau strukturierter Oberflächen (z.B. Wachscuticula der Pflanzen)
sammeln	ablagern	Feststoffe	Schleim des Filters von Schwämmen (Porifera), Klebezungen bei Amphibien und Reptilien, Fangschleim des Sonnentaus (<i>Drosera</i>)
		strukturierte Stoffe	Schleim des Filters von Schwämmen (Porifera), Klebezungen bei Amphibien und Reptilien, Fangschleim des Sonnentaus (<i>Drosera</i>)
	absorbieren	elektromagnetische Wellen und Licht	Färbungen zur Tarnung (z.B. bei Kopffüßlern (Cephalopoda)), Schwarze Haut des Eisbären (<i>Ursus maritimus</i>), Abplatten von Reptilien (Sonnebad)
		Kräfte, Energie und Momente	Knorpel, Muskeln, Entzündungsreaktion (Blasenbildung), Aufhängung des Spechtsschnabels (Picidae), Lagerung von Horn und Geweih bei männl. Paarhufern (Artiodactyla: Hirsche (Cervidae) und Hornträger (Bovinae: Rinder, Antilopen, etc.))

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
sammeln	absorbieren	mechanische Wellen und Schallwellen	Knorpel, Muskeln, Entzündungsreaktion, Aufhängung des Spechtsschnabels (Picidae), Ohrmuscheln (insbesondere von Fledermäusen (-tieren: Chiroptera) und anderen nachtaktiven Tieren)
		molekulare und submolekulare Partikel	Darm, Lunge, Nasenschleimhaut, Geschmackszellen, Endocytose (Vesikel)
		thermische Energie	Schwarze Haut des Eisbären (Ursus maritimus), Abplatten von Reptilien (Sonnebad)
	einbetten	molekulare und submolekulare Partikel	"Vergiftung" von Geweben
messen/ erkennen	speichern	elektrische Energie	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)
		thermische Energie	Isolation (Fett), Thermische Zonung (Vogelbeine), Chemische Energie (Verbrennung), Fell/Federn sträuben
	messen/ erkennen	chemische Verbindungen	Sensoren in Nasen und Mundschleimhaut (Geruch- und Geschmacksinn), Sensoren in Magenschleimwand
		Deformationsparameter	Muskelspindel (Wirbeltiere (Vertebrata)), Mechanorezeptoren
		elektromagnetische Wellen und Licht	Sehzellen des Auges, Phototaxis von Bakterien (Prokaryonten), Photorezeptoren
		Polarisation von elektromagnetischen Wellen	Insekten (Hexapoda), insbesondere Bienen (Apis)
		Feststoffe, Feststoffelemente	Tastsensoren der Haut, Sehzellen des Auges, Geschmackszellen
		Gas	Sensoren in Nasen und Mundschleimhaut
		geometrische Parameter	nur indirekt

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
messen/ erkennen	messen/ erkennen	Konzentrationsparameter	Chemotaxis von Bakterien (Prokaryonten)
		mechanische Wellen und Schallwellen	Thigmotaxis von Bakterien (Prokaryonten), Haarzellen der Labyrinthinnesorgane bei Wirbeltieren (Vertebrata), Kommunikation holzbewohnender Insekten (Hexapoda)
		Mengenparameter	nur indirekt
		Oberflächenparameter	Antennen der Insekten (Insecta)
		Parameter von elektrischen Feldern	Elektroortung bei Fischen (z.B. Gymnarchus)
		Parameter von Flüssigkeiten	Seitenlinienorgan der Fische (Osteichthyes) und Amphibien (Amphibia) zur Druckmessung
		Parameter von Kräften, Energie und Momenten	Thigmo-, Thermo- und Gravitaxis von Bakterien (Prokaryonten); Mechanorezeptoren, Muskelspindel (Wirbeltiere (Vertebrata))
		Parameter von magnetischen Feldern	Magnetsinn bei Bakterien (Magnetotaxis), Vögeln (Aves), Termiten (Isoptera), Walen (Cetacea), Haien (Selachii) (Induktion) und Knochenfischen (Osteichthyes)
		thermische Parameter	Wärmesinn der Klapperschlange (Crotalus) und Insekten (Insecta), Thermotaxis der Bakterien (Prokaryonten)
erzeugen/ syntheti- sieren	erzeugen	Doppelbrechung	
		Deformation	Muskelbewegung, Turgorbewegung, Wachstum
		elektrischer Strom	Elektroplax (z.B. Electrophorus), Bakt. Rhodofarax ferrireducens
		elektrische Entladung	Elektroplax (z.B. Electrophorus), Bakt. Rhodofarax ferrireducens
		elektrisches Feld	Elektroplax (z.B. Electrophorus), Bakt. Rhodofarax ferrireducens

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
erzeugen/ syntheti- sieren	erzeugen	elektromagnetische Wellen und Licht	Biolumineszenz (Leuchtkäfer (Lampyridae), Anglerfische (z.B. Lophius))
		Feststoffelemente	Wachstum (Zellteilung)
		Stoffstrom	Peristaltik, Flimmerepithel, Flagellenschlag im Filter der Schwämme (Porifera), Kontraktion von Cisternen, Blutsysteme
		Kräfte, Energie und Momente	Muskelaktivität, Turgor (Osmose), Quellen von Fasern (z.B. Sprengkräfte von Pflanzensamen), Stoffumsatz zur Wärmeerzeugung (nur bei homoiothermen Tieren)
		Gas	Bombardierkäfer (Brachynus)
		geometrische Objekte	siehe Feststoffelemente
		Abbild	Tarnung vor Hintergrund bei Kopffüßlern (Cephalopoda), allgemein Mimise
		Laserstrahlung	
		Flüssigkeiten	Sekretion (Speichel, Talg, Schleim)
		lose Stoffe	
		magnetisches Feld	
		mechanische Wellen und Schallwellen	Stimmritze, Trommeln
		molekulare und submolekulare Partikel	Stoffwechsel der Zelle
		Partikel	

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

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
bewegen	heben	lose Stoffe	Extremitäten zum Graben (Maulwurf (Talpa europaea), -sgrille (Gryllotalpa gryllotalpa)), Zungen, Mundwerkzeuge der Insekten (Insecta), Schweinerüssel (Suidae), Krallen
		Feststoffe	Hände, Schnäbel, Mäuler
	bewegen	Gas	Atmung (je nach Klasse sehr unterschiedlich), Bombardierkäfer (Brachynus), Termitenbau (Isoptera), Bau des Präriehundes (Cynomys ludovicianus)
		Flüssigkeiten	Cilien-/Flagellenschlag, Peristaltik, Spucken, Blutgefäße (optimal verzweigtes Röhrentransportsystem), Bewegung der Zellplasmas (Plasmaströmung des Actomyosin-Systems), Wassertransport in Pflanzen
		molekulare und submolekulare Partikel	Bewegung der Zellplasmas (Plasmaströmung des Actomyosin-Systems)
		Partikel	Strömung in Schwämmen, Flimmerepithel
		Feststoffe	Bewegung von Organismen zu Land, Luft, Wasser und unter der Erde, Peristaltik
		strukturierte Stoffe	Bewegung von Organismen zu Land, Luft, Wasser und unter der Erde, Peristaltik
		technische Objekte und Stoffe	
verformen	glätten	Feststoffelemente	Insektenflügel nach dem Schlüpfen aus dem Kokon, Blattformfaltung aus Knospe, Furchung von Kakteen (wasserspeichernde Pflanzen: Sukkulente), Kehlsäcke (Vögel (Aves)), Schwellkörper, Mimik, Putzverhalten (Federn, Fell und Antennen)

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
verformen	umformen	Feststoffe	Kauwerkzeuge, Kiefer und Zähne, Wachstum, Turgor, Abductin (Muscheln (Bivalvia), vernetztes Polymer), Resilin (Insekten (Hexapoden), vernetztes Polymer), Elastin (Aorta, globuläre Proteinkomplexe), Collagen (Haut, Kontraktion durch Ionen)
trennen	reinigen	chemische Verbindungen	Abbaureaktionen in der Leber, selektive Stoffaufnahme im Darm, Desinfektion im Magen (Säure)
		Feststoffelemente	Zungen (Wirbeltiere (Vertebrata)), kammförmige Zähne, Antennenputzapparat bei Insekten (Insecta), Lidschlag (Wirbeltiere (Vertebrata)), Wachs-Cuticula ("Lotuseffekt")
		Flüssigkeiten	Filterstrukturen der Schwämme (Porifera), Flamingos (Phoenicopterus) und Wale (Cetacea)
		Feststoffen	Zungen (Wirbeltiere), kammförmige Zähne (), Antennenputzapparat bei Insekten, Lidschlag (Wirbeltiere (Vertebrata)), Wachs-Cuticula ("Lotuseffekt")
	zerlegen	Feststoffe	Kauwerkzeuge, Kiefer und Zähne, Krallen, Stachel der Holzwespen (Siricidae), Bohrmuscheln (Petricola pholadiformis), Verdauung
	zerstören	chemische Verbindungen	Enzymreaktionen, Abbau durch Säuren/Basen
		strukturierte Stoffe	Kauen und chemische Aufspaltung im Verdauungstrakt
		technische Objekte und Stoffe	
	abtrennen	Teile von Feststoffen	Kauwerkzeuge von Gliedertieren (Arthropoda), Kiefer und Zähne der Wirbeltiere (insb. selbstschärfende, nachwachsende Zähne von Nagetieren (Rodentia)), Krallen, Stachel der Holzwespe (Siricidae), Bohrmuscheln (Petricola pholadiformis)

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
trennen	abtrennen	Feststoffe	Kauwerkzeuge, Kiefer und Zähne, Krallen, Bohrmuscheln (Petricola pholadiformis)
	entfernen	chemische Verbindungen	chem. Reaktionen
		Feststoffelemente	Verdauung
		Gas	Atmung
		Flüssigkeiten	Dickdarm
		molekulare und submolekulare Partikel	chem. Reaktionen
		Partikel	chem. Reaktionen
gewinnen	extrahieren	chemische Verbindungen	Verdauung (Kohlenhydrate, Proteine, Fette, Ionen, Wasser), Stofftransport an Pflanzenwurzeln (Rhizom)
		Gas	Kiemen der Fische (Pisces), Mollusken und Amphibien; Haut der Amphibien, Lungen
		Flüssigkeiten	Wasserentzug im Darm, Saugrüssel von Insekten (Insecta), osmotisches Potenzial (Pflanzenwurzeln)
		Stoff	
aufrecht erhalten	schützen	Feststoffelemente	Harz in Pflanzen, Giftstoffeinlagerung, Reparaturfunktionen (Immunsystem), Waabe (Wachs, Zellulose, ...), Nest (Gras, Äste, Lehm, ...), Verhornung der Haut, Wachs-Cuticula ("Lotuseffekt"), Pollenhülle (Sporopollenin), Stacheln
		technische Objekte und Stoffe	

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
aufrecht erhalten	schützen	elektrisches Feld	
		elektromagnetische Wellen und Licht	
		Flüssigkeitsstrom	Verdunstungsschutz der Pflanzen (Cuticula und Härchen der Königskerze (Verbascum))
		Konzentrationsparameter	Chemische Pufferung, adaptive und selektive Permeabilität biologischer Membranen
		Deformationsparameter	
		Parameter von elektrischen Feldern	Neuronale Steuerung der Elektroplox, Ruhepotenzial der Neurone
		Parameter von elektromagnetischen Wellen oder Licht	
		Flüssigkeitsparameter	Aufrechterhaltung des Turgors
		geometrische Parameter	Strukturversteifung durch Zellulose (Pflanzen, Bakterien (Prokaryonten)), Kalk (Korallen (Anthozoa), Knochen), Kieselsäure (Kieselalgen (Diatomeen)) und Chitin (Insekten), Aufrechterhaltung einer Position durch Muskelspindel-Reflexbogen bei Wirbeltieren (Vertebraten)
		Parameter von magnetischen Feldern	
	Parameter von Bewegung und Vibration	Selbsterregung des Herzens, neuronale Kontrolle, Bewegung des Zellplasmas	

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
aufrecht erhalten	stabilisieren	thermische Parameter	Speichern thermischer Energie (\uparrow), Schwitzen, Fächeln (afrik. Elefant (<i>Loxodonta africana</i>)), Durchblutungsregelung, Verbrennung von Nährstoffen
ausrichten	ausrichten	molekulare und submolekulare Partikel	Spindelapparat bei Zellteilung, Elementarmagnete für Magnetotaxis, piezoelektrischer Effekt des Knochens (Erregungsmechanisches Leitgerüst für den Transport von Kalziumverbindungen)
		Feststoffe	Haken (an Hakenstrahlen) Federn
		strukturierte Stoffe	
verbinden	zusammenfügen	Feststoffe	Krallen, Saugnapfe (Kopffüßler (Cephalopoden)), Härchen (Gecko (Gekkonidae)), Hinterlaibsenden (Cerci) von Insekten (Insecta), Gespinste (Kokon), Sehnen, Bänder, Wurzeln, Heftorgan der Schiffshalterfische (Echeneidae), Schädelnähte (Sutura), Widerhaken (Klette (Arctium), Wespenstachel (Vespidae), Fangzähne der Raubtiere (Carnivoren), ...), Haftlappen der Insektenextremitäten, Klebstoffe (Miesmuschel u.v.m. (<i>Mytilus edulis</i>)), Hufe des Steinbocks (<i>Capra ibex</i>)
	mischen	Stoffe	
verteilen	verteilen	chemische Verbindungen	Tracheen, Lungen, Kiemen, Blutsystem, Endo- und Exocytose, Duftdrüsen, Sekretion
		Drehmoment	
		Druck	Extremitäten der Tiere, Bandscheibe, Meniskus
		elektrische Energie	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)
		elektrische Entladung	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)

Funktion I	Funktion II	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen
verteilen	verteilen	elektrisches Feld	Elektroplax des Zitteraals (Electrophorus)
		elektromagnetische Wellen und Licht	Biolumineszenz (Leuchtkäfer (Lampyridae), Anglerfische (z.B. Lophius))
		Feststoffe	Flugsamen der Pflanzen, Exkretion des Nilpferds (Hippopotamus)
		Flüssigkeiten	Blutsystem (optimale Verzweigung), Wasserleitung bei Pflanzen
		Gas	Tracheen, Lungen, Kiemen, Blutsystem, Bauten von Termiten (Isoptera) und Präriehunden (Cynomys ludovicianus)
		Gewicht	Extremitäten der Tiere, Bandscheibe, Meniskus
		Kräfte, Energie und Momente	Extremitäten der Tiere, Bandscheibe, Meniskus
		mechanische Wellen und Schallwellen	Ohren von Wirbeltieren (Vertebrata)
		thermische Energie	Blutsystem, Bauten von Termiten (Isoptera), thermische Zonung

Zusammenfassende Darstellung der Inhalte der in Kapitel 4.5.3.2 erwähnten Studienarbeiten

In dieser Zusammenstellung fehlt die Arbeit von FRITSCH (2002). Sie wird in Kapitel 6.1.2 detailliert beschrieben.

Konzipieren eines flexiblen Werkzeugschafts für roboterunterstützte minimalinvasive Operationen (AMMER 2002; PECQUET 2003)

Für Herzoperationen wurden roboterunterstützte, fernwirkende Systeme entwickelt, die den damit örtlich vergleichsweise ungebundenen Chirurgen unterstützen sollen. Die Systeme wurden zunächst für das Militär entwickelt und sollten eine chirurgische Versorgung im Gefechtsgebiet ermöglichen, ohne dass sich der behandelnde Arzt einer Gefährdung aussetzen müsste. Für den zivilen Bereich sind diese Systeme interessant, da sie die Präzision von Operationen erhöhen können. Des Weiteren besteht die Vision, dass z.B. ein Spezialist von München aus einen Patienten in Tokio mit diesem System behandeln könnte.

Technisch sind die Operationsroboter mit Industrierobotern vergleichbar. Ihre Werkzeuge ähneln den üblichen manuellen, weisen aber einen zusätzlichen Freiheitsgrad an ihrer Spitze auf. Bei Herzoperationen werden die Werkzeuge zwischen den Rippen durchgeführt. Zum Verfahren der Werkzeugspitze innerhalb des Patienten wird der starre Werkzeugschaft vom Roboter um den sich durch den Körpereintritt ergebenden Drehpunkt bewegt. Dies führt zu einer starken Belastung des Gewebes am Werkzeugeintritt in den Körper und schränkt den Aktionsradius während der Operation deutlich ein. Ziel war es dementsprechend einen flexiblen Werkzeugschaft zu konzipieren, der das Gewebe am Körpereintritt nicht mehr belasten sollte.

Ammer untersuchte auf welche Arten in der Natur Bewegungen erzeugt werden und stellte eine Sammlung vielversprechender Analogsysteme in abstrahierter Form zusammen. Dazu zählten Würmer, der Elefantenrüssel, Wirbelsäulen (etwa von Schlangen), die Turgorbewegung von Pflanzenranken und -wurzeln sowie die Anatomie des menschlichen Arms. Aus diesem Set wurde mittels Bewertungsmethoden die Turgorbewegung für eine technische Umsetzung ausgewählt. Ammer entwickelte einen skalierten Prototyp aus elastischen Schläuchen, die je nach Füllung ihre Größe änderten und innerhalb eines radial starren Schlauchs durch Kammern gekoppelt waren. Durch unsymmetrische Befüllung konnte so vergleichbar zu der Turgorbewegung in der Natur ein Krümmen der Struktur erreicht werden.



Abbildung 9-1: Funktionsprototyp Ammers. Links: Bauteile, rechts: System in gekrümmter Form.

Pecquet entwickelte das System Ammers weiter. Sie erreichte eine weitere Miniaturisierung, indem sie das Prinzip des Integralbaus anwendete. Die Schläuche wurden durch Silikonkammern ersetzt, die um einen ausschmelzbaren Wackskern gegossen wurden. Um Ausdehnungen nur in Richtung des Werkzeugschafts zu erzielen, waren die Zellen mit feinen Aluminiumringen verstärkt. Die Zellen wurden zu je dreien pro Querschnitt mit Silikon vergossen.

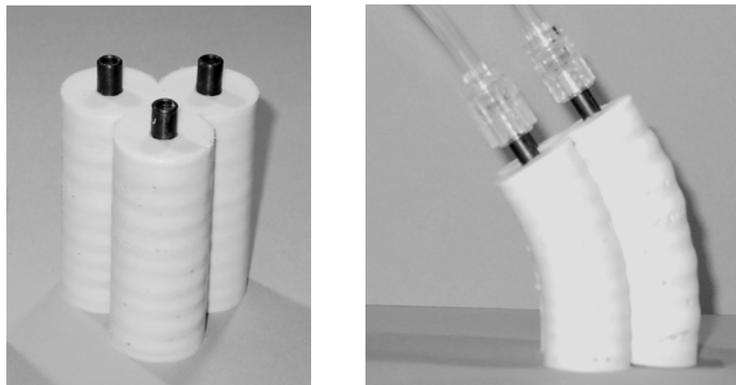


Abbildung 9-2: Funktionsprototyp Pecquets. Links: Eine Einheit des Systems in Ruhezustand, rechts: System in gekrümmter Form.

Die Suche nach Analogien war rückblickend in diesem Fall nicht allzu schwierig. Partiiell gestaltete sich die Suche nach weiterführender Information aufwändig. Dies betrifft vor allem die Anatomie des Elefantenrüssels. In Deutschland fand sich hierzu lediglich eine Quelle aus den zwanziger Jahren, die die gesuchte Anordnung einzelner Muskeln dokumentierte. Am anspruchsvollsten war letztlich die technische Realisierung des sehr abstrakten Ausgangskonzepts.

Konzept für die Energierückgewinnung innerhalb des Haushalts (GAULL 2003)

Gaull hatte die Aufgabe, die Dissipation von Energie in Haushalten zu verringern. Mittels einer systematischen Untersuchung anhand der in Haushalten auftretenden Energien (thermisch, elektrisch und mechanisch) suchte er mögliche Ansatzbereiche. Einige davon waren Rolläden, Türen und Schranken für die Rückgewinnung mechanischer Energie, sowie über häusliche Abwässer und Abluft von Herden dissipierende thermische Energie. Analogien in der Natur waren die Rückgewinnung von mechanischer Energie durch elastische Sehnen in den Sprungbeinen von Kängurus, und die Rückgewinnung und Umverteilung thermischer Energie durch Wärmetauscher (rete mirabile) in Gefäßsystemen.

Das Rückgewinnen mechanischer Energie wäre durch das Anbringen von Federspeichern möglich gewesen. Da Türschließer nach diesem Prinzip arbeiten, wurde das Konzept nicht weiter verfolgt. Die Rückgewinnung thermischer Energie aus Abwässern hätte entsprechend den biologischen Vorbildern durch eine Ankopplung an den Vorlauf für die Warmwasserversorgung über einen Wärmetauscher erfolgen können. Recherchen ergaben, dass entsprechende Systeme bereits handelsüblich sind, das Konzept wurde also ebenfalls nicht weiter verfolgt. Die Rückgewinnung thermischer Energie von Herden wäre durch an den Vorlauf der Warmwasserversorgung angeschlossenen Kollektoren möglich gewesen. Gaull entwickelte schließlich für Großküchen ein stark abstrahiertes System, bei dem Herde und Kühlgeräte thermisch über Zeolite gekoppelt sind. Die Wärme der Herde wird dabei zum Ausheizen von Zeoliten genutzt, die sonst zur Erzeugung von Verdunstungskälte für die Kühlgeräte verwendet werden.

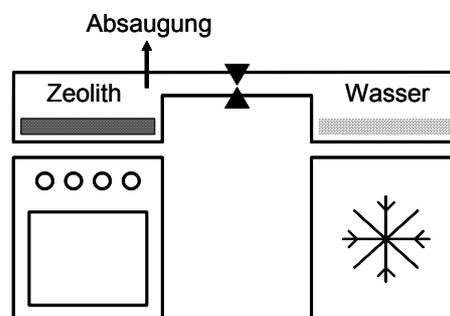


Abbildung 9-3: Vereinfachte Darstellung des Konzepts.

Die Suche nach Analogien war im vorliegenden Fall beherrschbar. Dies ist vor allem der bestehenden Bionikliteratur zu verdanken, die gerade die Bioenergetik als wichtiges Thema behandelt. Die Umsetzung des letztlich sehr komplexen Konzepts führte in erster Linie zu anspruchsvollen fertigungstechnischen Problemstellungen.

Thermische Zonung (Nopper 2003)

In der Natur existiert ein in der Technik unbekanntes Konzept zur Isolation. Tiere haben häufig sehr schlanke Extremitäten. Um sich schnell zu bewegen, wäre eine Isolation dieser nur hinderlich. Betrachtet man im Winter z.B. Enten, die stundenlang auf dem Eis stehen können, fragt man sich, wie es möglich ist, dass diese Tiere weder erfrieren, noch „durch das Eis schmelzen“. Tatsächlich sind die Extremitäten der Enten thermisch entkoppelt. Dies wird durch eine Art Wärmetauscher zwischen Körper und Extremität erreicht, in dem das in die Extremitäten strömende Blut seine Wärme an das rückströmende kalte Blut abgibt. Über Änderungen des Gefäßtonus können die Tiere den Wärmetransport so steuern, dass sie ihre Extremitäten fast auf Außentemperatur bringen können, solange diese über dem Gefrierpunkt liegt. Liegen die Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt, kühlen die Extremitäten der Vögel auf nahe 0°C ab. Wärmeverluste ergeben sich dann durch die Temperaturdifferenz zu 0°C .

Nopper suchte technische Anwendungsgebiete für dieses Prinzip der Isolation. Von Interesse waren alle durchströmten Systeme, die im Zweifelsfall vor Frost geschützt werden müssen. Die Suche gestaltete sich relativ schwierig, da die potenziellen Systeme nur durch sehr allgemeine Begriffe beschreibbar waren und so bei der Internetrecherche eine nicht verarbeitbare Fülle von Treffern ergaben. Aus einer Fülle von denkbaren Anwendungen wählte Nopper den Frostschutz von Installationen aus. Er entwickelte ein Konzept, das er für Außenwasserhähne realisierte und erprobte. In diesem Konzept wird innerhalb des Hahns eine Mikrozirkulation von Wasser durch eine kleine Pumpe aufrechterhalten. Diese Pumpe wälzt das in der Leitung stehende Wasser über einen eingeschobenen, dünnen Schlauch um. Dadurch findet ein gezielter Wärmetransport aus dem Haus in den Wasserhahn statt. Für extrem niedrige Temperaturen lässt sich das System durch einen Wärmetauscher mit Gebläse erweitern. Letztlich lässt sich ein Hahn auch durch ungeheizte, frostfreie Keller, oder direkt durch Erdwärme vor Frost schützen. Das System bietet gegenüber elektrisch beheizten Armaturen energetische Vorteile.

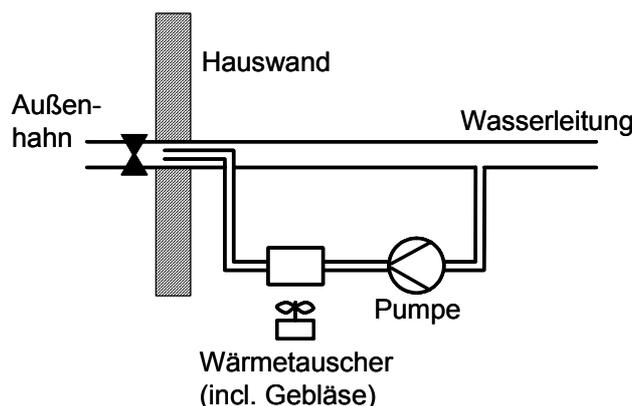


Abbildung 9-4: Vereinfachte Darstellung des Konzepts.

Der Aufwand bei der Suche nach Einsatzgebieten für das Prinzip der thermischen Zonung war rückblickend vergleichbar mit dem umgekehrten Vorgehen, bei dem man ausgehend

von technischen Problemstellungen Lösungsanalogien in der Natur sucht. Die technische Umsetzung war vergleichsweise einfach.

Bewegung von Flüssigkeiten mittels Geißeln (Bauer 2003)

In der Natur bewegen sich Organismen durch Flossen, Rückstoß oder Geißeln im Wasser. Flossen und Antriebe mittels Rückstoß wurden bereits technisch umgesetzt und erprobt. Die sehr kleinen Geißelantriebe sind bislang nicht technisch umgesetzt.

Bauer entwickelte ein stark skaliertes Konzept für Geißelantriebe. Dieses besteht aus einer Doppelgeißel aus Stahlseilen, die an einer Nabe befestigt sind. Handversuche mittels Modellbauschiffsschrauben und den prototypischen Geißeln waren vielversprechend. Eine genauere Messung an einem Prüfstand ist derzeit noch nicht abgeschlossen. Erste Ergebnisse deuten aber auf ein unerwartet hohes Potenzial dieses Konzepts hin.

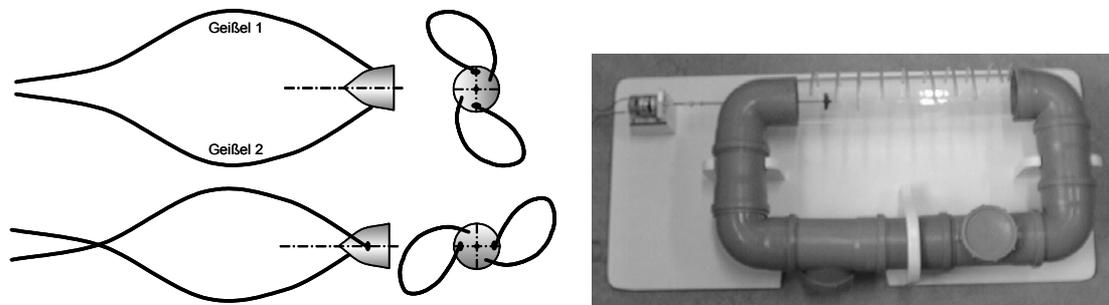


Abbildung 9-5: Links: Ansichten des Geißelantriebs, rechts: Prüfstand für erste, orientierende Versuche.

Die Übersetzung der biologischen Vorlage in ein technisches Konzept war in diesem Fall relativ einfach. Interessant ist, dass trotz des von ZERBST (1987) und anderen Autoren als sträflich bezeichneten Vorgehens mit Inkaufnahme eines sehr deutlichen Skalierungsfehlers ein positives Ergebnis erzielt wurde.

Kraft und Wegerzeugung mittels Osmose (Mößnang 2003)

Durch Osmose können sehr hohe Kräfte erreicht werden. Zu beobachten ist dies zum Beispiel an Baumwurzeln und Pflanzensamen, die Asphaltdecken hochdrücken und Grundgestein sprengen können. Osmose wird auch technisch in Form von Umkehrosmose genutzt. Dazu wird eine Lösung unter hohem Druck gesetzt. Ist dieser höher als der osmotische, lässt sich reines Wasser durch eine semipermeable Membran pressen, während gelöste Stoffe diese nicht passieren können. Letztlich handelt es sich hierbei um eine Filterung von Wasser auf molekularer Ebene.

Mößnang entwickelte ein Konzept osmotische Kräfte zu erzeugen. Es handelt sich dabei um einen Zylinder, in dem sich eine gesättigte Lösung befindet, in die durch eine semipermeable Membran Wasser nachströmen kann. Die entstehenden osmotischen Drücke lassen sich über einen Kolben als mechanische Kraft abtragen. Technisch schwierig war

hierbei eine Abstützung der empfindlichen Membran zu erreichen. Realisiert wurde dies durch gesinterte Platten, die vom Wasser durchströmt werden konnten. Das Auffinden einer geeigneten Membran war ebenfalls schwierig. Die in der Umkehrosmose verwendeten Membranen werden durch den anliegenden Druck elastisch verformt. Dies führt zu einer Aufweitung der Poren. Liegt dieser Druck nicht an, sind diese Membranen zunächst nicht für Wasser durchlässig, sind also für diesen Anwendungsfall ungeeignet.

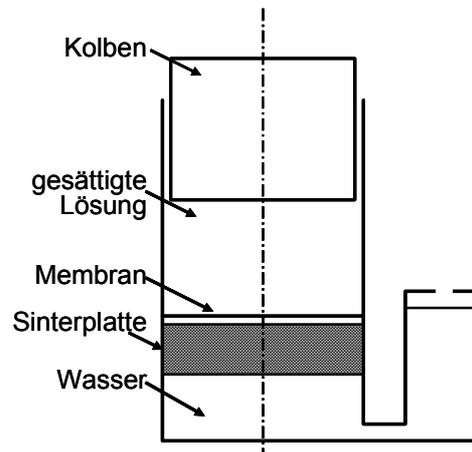


Abbildung 9-6: Prinzipskizze des osmotischen Aktors.

Im vorliegenden Fall war die Ableitung eines abstrakten technischen Konzepts vergleichsweise trivial. Schwierigkeiten ergaben sich bei der konstruktiven Umsetzung. Aufwändig war hier insbesondere das Auffinden von Dichtungen mit sehr geringem Leckstrom, geeigneten Membranen und Strukturen, die die Membran abstützen und gleichzeitig von Wasser durchströmt werden können.

10 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 SAUERMANN, 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 GIAPOULIS, 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 STÖBER, 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 ABMANN, 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 Hilfsmiteleinführung 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, Band 52)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung, Band 53)
Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003 (Als Diss. eingereicht)