

Peter Börsting

**Konstruktionsbarrieren in der  
Mikrosystemtechnik und deren Überwindung  
durch einen Funktionskatalog**

Obstacles in Microsystems Design and  
Development of a Functions Catalogue

Band 57

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers







Forschungsberichte



Peter Börsting

**Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik und deren Überwindung durch einen Funktionskatalog**

Obstacles in Microsystems Design and Development of a Functions Catalogue

Band 57

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2012  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen  
06224-7697915

ISSN 1615-8113

# **Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik und deren Überwindung durch einen Funktionskatalog**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Peter Börsting  
aus Ahaus i. Westf.

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Oktober 2012  
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. V. Saile





## **Vorwort des Herausgebers**

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers



## **Vorwort zu Band 57**

Ausgehend von intensiven Forschungen zur Miniaturisierung technischer Systeme ist ein neuer Bereich in der Technik entstanden, die sog. Mikrosystemtechnik. Unter Mikrosystemtechnik versteht man in diesem Zusammenhang technische Systeme, bei denen zumindest große Teile der die wesentlichen Funktionen bestimmenden Komponenten im Mikrometer-Bereich entwickelt und hergestellt werden. Dabei ist die Mikrosystemtechnik sehr breit aufgestellt. Ausgehend von Lösungen auf der Basis von Silizium im Umfeld der Chipfertigung bis hin zu mechanischen Systemen, die durch die Miniaturisierung konventioneller Fertigungsprozesse erzeugt werden, sind eine Vielzahl von Fertigungslösungen entwickelt worden. Anwendungen gibt es z. B. in den Bereichen der Medizintechnik, der Mechatronik, im Bereich neuartiger Sensorik und Aktuatorik bis hin zu gefertigten Mikromesssystemen für die Fahrzeugtechnik, wo dann z. T. sehr große Stückzahlen erreicht werden. Gemeinsam ist allen technischen Lösungen, also den Produkten, die im Bereich der Mikrosystemtechnik entwickelt werden, dass sie sehr stark durch die zugrunde gelegten Fertigungstechniken geprägt sind. Die Fertigungstechniken sind z. T. sehr speziell und anlagentechnisch auch enorm kostspielig, so dass man eigentlich heute davon ausgehen muss, dass die entwickelten technischen Systeme sehr stark durch das gerade zur Verfügung stehende Fertigungsverfahren definiert werden. Damit entstehen natürlich Beschränkungen im Lösungsraum für den entwickelnden Konstrukteur solcher technischer Mikrosysteme. Zusätzliche Beschränkungen in der konstruktiven Synthese entstehen durch die nur eingeschränkte Übertragung von Erfahrungswissen aus dem Makrobereich in den Bereich der dimensional „Mikrosysteme“.

An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Peter Börsting an. Er definiert und untersucht mögliche, wie er es nennt, Konstruktionsbarrieren im Produktentstehungsprozess der Mikrosystemtechnik und erforscht erste Vorschläge zur Überwindung dieser Konstruktionsbarrieren. Herr Dr. Börsting entwirft mit seiner Arbeit einen ganz neuen Blick auf den Menschen im Produktentstehungsprozess von mikromechanischen Systemen und liefert wertvolle Hinweise, wie der Mensch bei dieser komplexen Synthesaufgabe unterstützt werden kann. Die Arbeit wird sicher Ausgangspunkt für neue Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik sein!



„Nihil est in intellectu, quin prius fuerit in sensu.“<sup>1</sup>

<Giovanni Nevizano, Sylva nuptialis, 1521>

---

<sup>1</sup> Nichts ist im Verstand, ohne vorher in den Sinnen gewesen zu sein.



## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Konzept der *Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik* entwickelt, um zu beschreiben, welche spezifischen Barrieren der Konstruktion mikrotechnischer Systeme entgegenstehen. Die Konstruktionsbarrieren werden motiviert und abgeleitet aus der *Entwicklung einer Mikro-Gasturbine*, die als empirische Untersuchung retrospektiv betrachtet wird.

Dabei wird in der oft als technologiegetrieben bezeichneten und in der Folge oft um technologische Probleme zentrierten Mikrosystemtechnik ein Perspektivenwechsel vollzogen, der den *Menschen in den Mittelpunkt* der Betrachtungen rückt. Basierend auf grundlegenden Forschungsarbeiten zur Kognitionspsychologie werden die Ursachen der untersuchten Konstruktionsbarrieren diskutiert und der Bedarf nach entsprechend angepasster Konstruktionsunterstützung skizziert.

Diese Konstruktionsunterstützung wird durch den Aufbau eines *Funktionskatalogs* konkretisiert, der am klassischen Konzept eines Konstruktionskatalogs orientiert ist. Der wesentliche Unterschied des Funktionskatalogs zu einem Konstruktionskatalog besteht in den Möglichkeiten des Zugriffs auf die Inhalte des Katalogs. Klassische Konstruktionskataloge können lediglich in der *Synthese* eingesetzt werden, um zur Umsetzung gewünschter Funktionen bereits existierende Lösungsvorschläge zu präsentieren. Im Gegensatz dazu kann der Funktionskatalog auch in der *Analyse* eines unbekanntem technischen Systems eingesetzt werden, um von der bereits vorliegenden Gestalt auf die Funktionen des Systems rückschließen zu können. Dazu wurde dem Funktionskatalog die *Geometrische Funktionsanalyse* als erweiterter Zugriffsteil hinzugefügt. Diese basiert auf der geometrischen Ähnlichkeitssuche, die ihrerseits erst vor wenigen Jahren entwickelt wurde, um die Verwaltung von 3D-Objekten in CAD-Systemen oder in der 3D-Computerspielentwicklung zu verbessern.

Schließlich werden die Ergebnisse der präsentierten Forschungsarbeiten in das *Zentrum für integrierte Mikroproduktion (ZIM)* überführt, das im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 499 (SFB 499) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entwickelt wurde und zur nachhaltigen Bereitstellung des erarbeiteten Wissens genutzt wird. Dadurch wird die Anknüpfung weiterführender an bereits geleistete Forschungsarbeiten, z.B. zur umfassenden Validierung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit im Rahmen empirischer Studien, vereinfacht. Das entwickelte Referenzprozessmodell dient dabei insbesondere zur *integrierten* Planung, Umsetzungsunterstützung und Koordination dieser Projekte, während der Funktionskatalog insbesondere eine *Umsetzungsunterstützung des Systemkonstruktors* bietet.





## Abstract

The present work describes certain inherent problems in microsystems design that a design engineer is exposed to and has to cope with in order to produce innovative systems designs. The source of these “inherent problems” is explored based on essential works on cognitive psychology and the findings are then consolidated in the concept of „obstacles in microsystems design“.

The findings are based on a development project of a micro gas turbine and the subsequent development of a reference process model that are used as empirical studies retrospectively.

While microsystems technology and MEMS are often connoted to be technology driven and studies in this field often address certain technology centered problems, the present work is shifting perspectives to focus on the design engineer as lynchpin in technical product development projects instead. Based on this shift, the need for design support is motivated and outlined.

A corresponding approach for design support is substantiated by the development of a functions catalog, which is oriented on the classic concept of design catalogs. The main difference of the function catalog in contrast to design catalogs consists in the possibilities of accessing the catalog’s contents. Classical design catalogs can only be used in system synthesis to present possible solutions to desired functions. In contrast, the functions catalog can also be used to analyze unknown technical systems, helping to draw conclusions from already present geometrical forms to the functions of the system. This access possibility is realized by developing the geometrical function analysis, adapting geometrical similarity search and connecting it to the functions catalog appropriately. The geometrical similarity search itself was developed only a few years ago from different researchers to improve the management of 3D objects in CAD systems or in 3D computer game development.

Finally, the results of the present work are transferred to the *Center for Integrated Micro Manufacturing (ZIM)* to realize sustainability and easy access, e.g. for future validation approaches of the present work in extensive empirical studies or for further development of the approaches in different scientific projects.

The presented reference process model for tool-based micro technologies can be used to plan and coordinate integrated development projects in the future, while the functions catalog can support the design engineer.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Insbesondere die Erfahrungen, die ich während der Bearbeitung der Teilprojekte „Entwicklungsmethodik“ und „Konstruktionsdienstleistungen“ des Sonderforschungsbereichs 499 (SFB 499) „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ sammelte, waren der Grundstein für diese Arbeit.

*„[Die Kreativität des Einzelnen als auch die der Gruppe] braucht ein Setting, in dem Identifikation mit der Arbeit und Selbstverwirklichung großgeschrieben wird, in dem ein Klima der Dynamik und der Wechsel zwischen planvoller, strukturierter Arbeit – sogar mit Druck – und spielerischer Freiheit möglich sind. In einer Atmosphäre des Vertrauens sollte es erlaubt sein, auch einmal einen gedanklichen oder praktischen Fehler zu machen, sich auszuprobieren, insgesamt also der Lust zur Sache zu folgen und so das kreativ bearbeitete Thema ‚zum Teil des Lebens zu machen‘.*

*In einer idealen kreativitätsfördernden Welt herrschen materielle Sorgenfreiheit, exzellentes Arbeitsklima und flache Hierarchien – die beste Idee gewinnt. Auch sinnvolles Elitebewusstsein und Begeisterung dürfen nicht fehlen, darüber hinaus muss zwanglos spontane Kommunikation möglich sein und die Freude an der intellektuellen Auseinandersetzung das geistige Klima bestimmen.“<sup>2</sup>*

Dieses Zitat beschreibt mit erstaunlicher Genauigkeit den von mir am IPEK wahrgenommenen Arbeitsalltag und drückt genau das aus, wofür ich meinen Kollegen und insbesondere meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, danken möchte, der kontinuierlich daran arbeitet, die im zweiten Absatz beschriebene „ideale kreativitätsfördernde Welt“ – zumindest am IPEK – Wahrheit werden zu lassen.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Volker Saile danke ich für die Übernahme des Korreferats, das entgegengebrachte Interesse und die Diskussionen der vorliegenden Arbeit.

Weiterhin möchte ich Corinna Allerkamp und Christoph Weinreuter danken, die der Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit in anregenden Diskussionen weitere Impulse versetzten und in ihren Diplomarbeiten eindrucksvoll darstellen, wie

---

<sup>2</sup> Peter H. Krammer: „Big Science und die Wurzeln der Kreativität“. In: Kreativität. Hrsg.: Rainer M. Holm-Hadulla. Springer, Heidelberg, 2000.

eine konkrete technische Umsetzung der in der vorliegenden Arbeit diskutierten methodischen Konstruktionsunterstützung aussehen könnte.

Für die kritische Begleitung der Arbeit mit bohrenden Fragen und hilfreichen Anmerkungen in einer immer sehr konstruktiven Arbeitsatmosphäre möchte ich mich insbesondere bei Tobias Deigendesch, Leif Marxen, Norbert Burkardt und Eike Sadowski bedanken.

Der wesentliche Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit wurde aber durch meine Familie – meine Frau Veronika und unsere beiden Kinder Janes und Nora sowie durch unsere Eltern – geleistet, die mir zuweilen die nötige Motivation, zuweilen die ebenso wichtige Ablenkung und die ungeliebten wenn auch notwendigen Freiräume zur Realisierung dieser Arbeit verschaffte. Ich werde es wieder gut machen!

Karlsruhe, im Oktober 2012

Peter Börsting

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung und Nutzen . . . . .	2
1.3	Forschungsansatz und Struktur der Arbeit . . . . .	3
1.4	Notation zur Visualisierung der Zusammenhänge . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>7</b>
2.1	Definition Mikrosystemtechnik . . . . .	7
2.2	Innovation . . . . .	7
2.2.1	Definition . . . . .	7
2.2.2	Klassierung von Innovationen . . . . .	8
2.3	Der Mensch im Mittelpunkt der Produktentwicklung . . . . .	9
2.4	Ingenieur, Entwickler, Konstrukteur? . . . . .	12
2.5	Konstruktion einer Mikro-Gasturbine . . . . .	13
2.5.1	Zielsetzung der Demonstrationssystementwicklung . . . . .	13
2.5.2	Erfüllung der Zielsetzung . . . . .	14
2.5.3	Herausforderungen in der Umsetzung . . . . .	15
2.5.4	Zwischenfazit . . . . .	19
2.6	Produktentwicklungsprozesse . . . . .	21
2.6.1	Maschinenbau . . . . .	21
2.6.2	Mikroelektronik . . . . .	29
2.6.3	Softwaretechnik . . . . .	33
2.6.4	Mechatronik . . . . .	38
2.6.5	Mikrosystemtechnik . . . . .	40
2.7	PEP-Modell Mikrounformen . . . . .	45
2.7.1	Managementunterstützung vs. Mitarbeiterunterstützung . . . . .	46
2.7.2	Eigenschaften des zu speichernden Mikro-PEP-Wissens . . . . .	47
2.7.3	Geschäftsprozessmodellierung . . . . .	48
2.7.4	Referenzprozessmodell Mikrounformen . . . . .	48
2.7.5	Zwischenfazit . . . . .	49
2.8	Kognitionspsychologie . . . . .	49

2.8.1	Die Sinne des Menschen . . . . .	50
2.8.2	Empfindung . . . . .	51
2.8.3	Wahrnehmung . . . . .	51
2.8.4	Schemata und mentale Modelle . . . . .	52
2.8.5	Erkenntnis . . . . .	53
2.8.6	Intuition . . . . .	54
2.8.7	Erweiterung der Beobachtbarkeit . . . . .	56
2.8.8	Zwischenfazit . . . . .	56
2.9	Intelligenz, Kreativität, Analogie . . . . .	58
2.9.1	Intelligenz . . . . .	58
2.9.2	Kreativität . . . . .	65
2.9.3	Analogiebildung . . . . .	69
2.10	Skalierung . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Motivation und Zielsetzung</b>	<b>75</b>
3.1	Motivation . . . . .	75
3.1.1	Entwicklungsmethodik in der Mikrosystemtechnik . . . . .	76
3.1.2	Entwicklungsmethodische Lücke . . . . .	77
3.2	Konkretisierung der Zielsetzung . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik</b>	<b>79</b>
4.1	Analyse und Synthese im PEP . . . . .	79
4.1.1	Analyse . . . . .	80
4.1.2	Synthese . . . . .	80
4.1.3	Die Korrelation von Analyse und Synthese . . . . .	81
4.1.4	Analogiebildung in der Analyse . . . . .	84
4.1.5	Analogiebildung in der Synthese . . . . .	85
4.2	Die Technologiebarriere . . . . .	86
4.2.1	Die Marktstruktur in der Mikrosystemtechnik . . . . .	86
4.2.2	Beispiel: Entwicklung einer Mikroinduktivität . . . . .	88
4.2.3	Zwischenfazit . . . . .	90
4.3	Die Disziplinbarriere . . . . .	91
4.3.1	Multiple Kreativität . . . . .	91
4.3.2	Einheitliche Beschreibung disziplinspezifischer PEP . . . . .	92
4.3.3	Zur Korrelation multipler Kreativität und Disziplin . . . . .	93
4.3.4	Symbolsysteme in den Disziplinen . . . . .	96
4.3.5	Zwischenfazit . . . . .	99
4.4	Die Intuitionsbarriere . . . . .	101
4.4.1	Das Wahrnehmungsparadoxon . . . . .	104

4.4.2	7+/-2 Chunks . . . . .	108
4.4.3	Skalierungsproblematik . . . . .	109
4.4.4	Zwischenfazit . . . . .	111
4.5	Zusammenfassung zu Konstruktionsbarrieren . . . . .	112
<b>5</b>	<b>Konstruktionskataloge</b>	<b>115</b>
5.1	Die Grundidee von Konstruktionskatalogen . . . . .	116
5.1.1	Klassierung von Konstruktionskatalogen . . . . .	117
5.1.2	Aufbau von Konstruktionskatalogen . . . . .	117
5.1.3	Äußere Form . . . . .	118
5.2	Anwendung in der Produktentwicklung . . . . .	120
5.3	Konstruktionskataloge in der Mikrosystemtechnik . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Ein Funktionskatalog für die Mikrosystemtechnik</b>	<b>125</b>
6.1	Vorüberlegungen . . . . .	125
6.1.1	Überwindung der Konstruktionsbarrieren durch einen Funktionskatalog	125
6.1.2	Beeinflussung der Produktentwicklung . . . . .	127
6.1.3	Freiheit in äußerer Form . . . . .	127
6.2	Aufbau . . . . .	129
6.2.1	Der Interpretationsaspekt . . . . .	129
6.2.2	Gliederung des Funktionskatalogs . . . . .	130
6.2.3	C&C <sup>2</sup> -A für Funktionsintegration . . . . .	132
6.2.4	Geometrische Ähnlichkeitssuche . . . . .	133
6.3	Unterstützung der Systemanalyse . . . . .	135
6.4	Umsetzung . . . . .	135
6.4.1	Umsetzung des Funktionskatalogs . . . . .	136
6.4.2	Umsetzung der geometrischen Funktionsanalyse . . . . .	142
6.5	Bewertung des Ansatzes . . . . .	150
<b>7</b>	<b>Zentrum für integrierte Mikroproduktion</b>	<b>153</b>
7.1	Motivation für das ZIM . . . . .	153
7.2	Aufbauorganisation . . . . .	154
7.3	Informatorische Integration . . . . .	155
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>159</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	159
8.2	Ausblick . . . . .	160
8.2.1	Mikro-TRIZ-Box . . . . .	160
8.2.2	Immersive 3D-Reality . . . . .	161

8.2.3 Ausblick geometrische Funktionsanalyse . . . . .	161
Literaturverzeichnis . . . . .	163
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>
<b>A Referenzprozessmodell „Mikro-Urformen“</b>	<b>179</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Modelling Terminology DRM . . . . .	5
2.1	Klassierung von Produktinnovationen . . . . .	8
2.2	Problemarten . . . . .	10
2.3	Klassifikation von Barrieretypen nach Dörner (1979), S. 14 . . . . .	10
2.4	Systemkonstrukteur vs. Validierungsingenieur . . . . .	12
2.5	Entwicklung der Mikrogasturbine . . . . .	15
2.6	Mikro-Gasturbine . . . . .	16
2.7	Realisierte Mikro-Gasturbine . . . . .	17
2.8	Trennebenen am Formeinsatz des Laufrades. . . . .	19
2.9	Werkzeugkonzept Lauf-/Leitrad . . . . .	20
2.10	Formeinsatz Leitrad . . . . .	20
2.11	VDI 2221 . . . . .	27
2.12	Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM) . . . . .	28
2.13	Modell des mikroelektronischen Entwurfsprozesses . . . . .	29
2.14	Mikroelektronikentwurf auf Systemebene . . . . .	30
2.15	Mikroelektronikentwurf auf algorithmischer Ebene . . . . .	30
2.16	Mikroelektronikentwurf auf Registertransferebene . . . . .	31
2.17	Mikroelektronikentwurf auf Gatter-/Logikebene . . . . .	31
2.18	Mikroelektronikentwurf auf Schalter-/Transistorebene . . . . .	31
2.19	Mikroelektronikentwurf auf elektrischer Ebene . . . . .	32
2.20	Y-Diagramm . . . . .	34
2.21	Wasserfallmodell der Informatik . . . . .	36
2.22	Spiralmodell der Softwaretechnik . . . . .	37
2.23	V-Modell der Mechatronik . . . . .	40
2.24	Abbildung eines $\mu$ PEP im Brezel-Modell . . . . .	43
2.25	Sichelmodell . . . . .	43
2.26	V-Modell der Mikrosystemtechnik . . . . .	44
2.27	Unterschiedliche Anforderungen an Referenzprozessmodelle . . . . .	46
2.28	Zusammenhänge zentraler Begriffe der Kognitionspsychologie . . . . .	57
2.29	Zur Korrelation von Intelligenz und Kreativität (Erläuterungen im Text). . . . .	59

2.30 „Structure of Intellect“ nach Guilford . . . . .	62
2.31 Contrast Model nach Tversky . . . . .	70
2.32 Flugapparat da Vinci . . . . .	74
4.1 Erweitertes ZHO-Triple der Produktentwicklung . . . . .	82
4.2 Analyse und Synthese als zentraler Bestandteil der Produktentwicklung . . . . .	83
4.3 Technologiebarriere . . . . .	89
4.4 Beeinflussung der $\mu$ Produktentwicklung durch Technologiebarriere . . . . .	90
4.5 Zusammenhang multipler Intelligenz und Kreativität . . . . .	92
4.6 Disziplinspezifische Prägung auf multiple Intelligenzen und Kreativitäten . . . . .	97
4.7 Einsatz multipler Intelligenz und Kreativität bei der Systemsynthese . . . . .	98
4.8 Disziplinbarriere . . . . .	99
4.9 Beeinflussung der $\mu$ Produktentwicklung durch Disziplinbarriere . . . . .	101
4.10 Effektspektrum als generalisierte Modellvorstellung . . . . .	107
4.11 Effektspektrum: Transformation und Adaption . . . . .	108
4.12 Gedächtnisstruktur . . . . .	109
4.13 Beeinflussung der $\mu$ Produktentwicklung durch Intuitionsbarriere . . . . .	112
4.14 Beeinflussung der $\mu$ Produktentwicklung durch Konstruktionsbarrieren . . . . .	114
5.1 Konstruktionskatalog Beispiel . . . . .	119
5.2 Baukasten aktive Mikrosysteme: Bausteine . . . . .	121
5.3 Baukasten aktive Mikrosysteme: Arbeitsfluss . . . . .	122
5.4 Konstruktionskatalog Mikrogreifer . . . . .	123
6.1 Überwindung der Konstruktionsbarrieren . . . . .	128
6.2 Funktionsbeschreibung Mikrogreifer herkömmlich . . . . .	131
6.3 CAD-Modell Leitrad . . . . .	134
6.4 Monolithischer Mikrogreifer . . . . .	138
6.5 Struktur Funktionskatalog auf Wiki-Basis . . . . .	140
6.6 C&C <sup>2</sup> -M eines Mikrogreifers Bsp. 2 . . . . .	141
6.7 C&C <sup>2</sup> -M eines Mikrogreifers Bsp. 1 . . . . .	142
6.8 Suchanfragen in der geometrischen Funktionsanalyse . . . . .	144
6.9 Kontextabhängigkeit der Funktionsanalyse . . . . .	145
6.10 Unbekanntes Mikrosystem für Analyse . . . . .	147
6.11 Skizzieren einer Suchanfrage . . . . .	148
6.12 Suchantworten in der geometrischen Funktionsanalyse . . . . .	149
6.13 Verknüpfung geom. Funktionsanalyse und Funktionskatalog . . . . .	150
6.14 Beschreibung des Funktions-Gestaltzusammenhangs im Funktionskatalog. . . . .	151
7.1 Core-Team-Management . . . . .	154

---

7.2	Struktur des Zentrums für integrierte Mikrofertigung. . . . .	155
7.3	Homepage des Zentrums für integrierte Mikroproduktion (ZIM). . . . .	156
A.1	Referenzprozessmodell Mikrourformen . . . . .	180
A.2	Legende zum Referenzprozessmodell Mikro-Urformen. . . . .	181



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

*„Es ist davon auszugehen, dass bedeutende Innovationen nicht mehr in den 'Kernwissenschaften' wie Physik oder Chemie stattfinden werden, sondern in den Grenzbereichen, an denen solche Disziplinen wie Biotechnologie, Nanotechnologie, IuKTechnologien [Informations- und Kommunikationstechnologien] und auch Kognitionswissenschaften miteinander verschmelzen.“<sup>1</sup>*

In Bezug hierauf stellt das „Bundesministerium für Bildung und Forschung“ (BMBF) weiter fest, dass es die originäre Leistung der Mikrosystemtechnik ist, genau diese Verschmelzung von Einzeltechnologien und Disziplinen zu erreichen<sup>2</sup>.

Vergleicht man diesen Anspruch an die Mikrosystemtechnik mit den aktuellen Gegebenheiten, erkennt man die Größe der Herausforderung für Entwicklungsingenieure der Mikrosystemtechnik, die letztendlich eine Innovation zuerst erdenken müssen, bevor diese durch die Produktionstechnologien umgesetzt werden kann.

Da die Mikrosystemtechnik noch stark explorativ und von verschiedenen Disziplinen geprägt ist, entstammen auch die Entwicklungsingenieure in der Mikrosystemtechnik den unterschiedlichsten technischen Disziplinen wie der Elektrotechnik bzw. Elektronik, dem Maschinenbau, der Physik, der Verfahrenstechnik, der Mikrosystemtechnik, etc.

Die Mikrosystemtechnik ist eine vergleichsweise junge Disziplin, die von einer großen Anzahl an Start-Ups und Kleinstunternehmen mit eingeschränktem Technologieportfolio getragen wird. So beschäftigen laut einer aktuellen Umfrage ca. 40% der deutschen Unternehmen in der Mikrosystemtechnik zehn oder weniger Mitarbeiter.<sup>3</sup> Selbst Großunternehmen der Branche sind nur in einer begrenzten Anzahl von Technologien tätig, da der Know-How-Aufbau sehr kapitalintensiv ist. Unabhängig von ihrer Größe müssen die Unternehmen sich unweigerlich auf eine oder wenige Technologien zur Realisierung ihrer Mikrosysteme spezialisieren, um trotz technologischer Komplexität qualitativ hochwertige Mikrosysteme herstellen zu können. Dies gilt insbesondere für mikromechatronische Systeme, die aktorische, sensorische und informationsverarbeitende Funktionen vereinigen. Erschwerend kommt hinzu,

---

<sup>1</sup>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 33

<sup>2</sup>Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 13

<sup>3</sup>Vgl. IVAM (2011)

dass bis dato Methoden und Ansätze fehlen, Mikrotechnologien in den frühen Phasen der Produktentstehung sinnvoll miteinander zu kombinieren.

Im Rahmen verschiedener Entwicklungsprojekte makroskopischer Produkte in Kooperation mit Industrieunternehmen konnte der Verfasser dieser Arbeit das Potential von Intuition und Analogiebildung als Werkzeuge zur Problemlösung erfahren, durch die oftmals erfolgreiche, manchmal aber auch weniger erfolgreiche, aber immer unkonventionelle Ideen zur technischen Lösung eines Problems „aus dem Nichts“<sup>4</sup> auftauchten. Gleichzeitig musste der Verfasser dieser Arbeit im Rahmen der Bearbeitung der Teilprojekte „Entwicklungsmethodik“ und „Konstruktionsdienstleistungen“ des SFB 499<sup>5</sup> die Erfahrung machen, dass bei der Entwicklung von Mikrosystemen diese sonst so mächtigen Werkzeuge zur Ideenfindung oftmals versagten. Zwar kamen auch hier viele Ideen zustande, allerdings waren diese oft nicht „funktionsfähig“ oder realisierbar. Daraus entstand die Frage, ob es ein personenabhängiges Problem des Verfassers dieser Arbeit war, da dieser zu Beginn der Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik nur wenig mikrospezifisches Konstruktionswissen besaß, oder ob diese Probleme prinzipbedingt sind und aus der Funktionsweise von menschlicher Intuition und Analogiebildung resultieren. Die Beantwortung dieser Frage und die daran anschließende Entwicklung von Maßnahmen zur Konstruktionsunterstützung ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

## 1.2 Zielsetzung und Nutzen

Die initiale Zielsetzung ist implizit in der Beantwortung der Fragen enthalten, die durch die Motivation aufgeworfen werden:

- Wie beeinflusst die durch die technologische Komplexität einerseits und die kleinen Unternehmensgrößen andererseits bedingte, ökonomisch notwendige Einschränkung auf wenige Produktionstechnologien den Konstrukteur in der Entwicklung von Mikrosystemen?
- Wie beeinflusst die disziplinspezifische Prägung eines Konstrukteurs die Entwicklung von Mikrosystemen?
- Was sind die Voraussetzungen für die Nutzung von Intuition und Analogiebildung und welche Rolle spielen diese als Werkzeuge in der Produktentwicklung für Mikrosysteme?
- Weshalb bereiten diese ansonsten so mächtigen Werkzeuge für die Entwicklung von Innovationen in der Mikrosystemtechnik Probleme?

---

<sup>4</sup>Ob diese wirklich aus dem Nichts auftauchten, wird im Folgenden genauer diskutiert.

<sup>5</sup>Vgl. SFB 499 (2011)

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht also darin zu verstehen, durch welche Ursachen sich Charakteristika der Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik ergeben, die diese „mikrospezifisch“ werden lassen. Dabei soll in der typischerweise als „technologiegetrieben“ bezeichneten und oft um technologische Probleme zentrierten Mikrosystemtechnik ein Perspektivenwechsel vollzogen werden, der den Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtungen rückt. Die Notwendigkeit für diesen Perspektivenwechsel ist durch ALBERS<sup>6</sup> initiiert. Basierend auf dem so erzeugten Verständnis über die Zusammenhänge und die Interaktionen des Menschen mit mikrotechnischen Entwicklungsprozessen und Produkten wird ein Ansatz zur Unterstützung des Konstrukteurs in der mikrotechnischen Produktentwicklung abgeleitet.

In nachfolgenden Forschungsarbeiten, die das Ziel verfolgen, den Konstrukteur entwicklungsmethodisch weitergehend zu unterstützen, könnten damit zukünftig schneller die Zusammenhänge erkannt und zielgerichteter entsprechende Möglichkeiten zur Unterstützung des Konstrukteurs generiert werden. Letztlich soll damit den einleitend beschriebenen „bedeutenden Innovationen in den Grenzbereichen von Disziplinen und Technologien“ Vorschub geleistet werden.

## 1.3 Forschungsansatz und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist grundsätzlich orientiert an der „Design Research Methodology“ (DRM) von BLESSING<sup>7</sup>. Diese DRM beschreibt in einem entsprechenden Framework methodische Vorgehensweisen zur Erforschung der Produktentwicklung, zur Ableitung von Verbesserungsansätzen und zur Evaluation dieser Ansätze. Dieses Framework nutzt die Phasen „Research Clarification“ (RC) zur Entwicklung der Ziele, „Descriptive Study 1“ (DS-1) zur Entwicklung des notwendigen, grundlegenden Verständnisses, „Prescriptive Study“ (PS) zur Entwicklung von Verbesserungsansätzen und „Descriptive Study 2“ (DS-2) zur Evaluation dieser Ansätze. Die Abfolge der Phasen ist dabei nicht streng festgelegt, sondern ermöglicht die parallele Bearbeitung der Phasen und entsprechende Iterationen. Dabei kann der Startpunkt einer Untersuchung in jeder der Phasen liegen.<sup>8</sup> So impliziert die vorliegende Arbeit zwar eine streng sequentielle Durchführung der einzelnen Phasen der DRM, in der Realität war diese aber durch die genannten Iterationen, Parallelisierungen und Sprünge zwischen den Phasen geprägt.

Während der in Abschnitt 2.5 beschriebenen Entwicklung einer Mikro-Gasturbine und der nachfolgenden Ableitung eines Referenzprozessmodells für die urformende Mikrosystemtechnik in Abschnitt 2.7 wurde der Verfasser dieser Arbeit mit Problemen konfrontiert, die zur Formulierung erster Forschungsfragen führten und kondensiert in den vorangegange-

---

<sup>6</sup>Vgl. Zitate Albers in Vollmer (2011)

<sup>7</sup>Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009)

<sup>8</sup>Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009), S. 17

nen Abschnitten 1.1 und 1.2 wiedergegeben sind. Diese entsprachen im wesentlichen der Research Clarification, in der es darum geht, zu verstehen, wo das Problem liegt, welche Forschungsfragen untersucht und wie die weitere Forschungsarbeit ausgerichtet werden sollen.<sup>9</sup>

Darauf aufbauend folgte die Descriptive Study 1. Diese basiert einerseits auf der retrospektiv durchgeführten Betrachtung der durch den Verfasser dieser Arbeit entwickelten Mikro-Gasturbine und der daran anschließenden Entwicklung eines Referenzprozessmodells. Andererseits diente eine Literaturrecherche dazu, Zusammenhänge zu weiteren relevanten Bereichen wie der Kognitionspsychologie herzustellen.<sup>10</sup>

Die Prescriptive Study dient dazu, die in DS-1 erkannten Probleme durch die Entwicklung einer unterstützenden Methode zu adressieren. Die Umsetzung der in der Prescriptive Study erforschten Zusammenhänge und entwickelten Maßnahmen erfolgte unter Einbeziehung zweier eng aufeinander abgestimmter Diplomarbeiten.<sup>11,12</sup>

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Ergebnisse der Prescriptive Study zwar auf technische Funktionsfähigkeit getestet und gezeigt, dass die grundlegende Idee der geometrischen Funktionsanalyse prinzipiell umsetzbar ist, vgl. Abschnitt 6. Eine umfassende Evaluation der Ergebnisse in einer Descriptive Study 2 kann aber erst in realitätsnahen Produktentwicklungsprojekten der Mikrosystemtechnik auf Basis eines leichter bedienbaren Prototypen erfolgen.

Im Sinne der Nachhaltigkeit wurden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in das „Zentrum für integrierte Mikroproduktion“ (ZIM), vgl. Abschnitt 7, überführt. Über das ZIM stehen die Ergebnisse somit auch in Zukunft einfach auffindbar und abrufbar zur Verfügung.

## 1.4 Notation zur Visualisierung der Zusammenhänge

Die Gedankengänge und Argumentationsketten, die im Verlauf dieser Arbeit beschrieben werden, werden zur besseren Nachvollziehbarkeit unter Nutzung der von BLESSING<sup>13</sup> vorgeschlagenen Notation graphisch dargestellt, vgl. Abbildung 1.1. Einzelne „Aussagen“ verknüpfen zwei „Faktoren“ miteinander unter Angabe der „Quelle“, die der jeweiligen Aussage zugrunde liegt. Faktoren bestehen ihrerseits aus der Kombination eines „Elements“ und eines „Attributs“. Erst durch die Angabe eines Attributs kann ein Faktor mit anderen Faktoren in Relation gesetzt werden. Weiterhin kann die „Wirkung der Veränderung“ eines Faktors auf andere Faktoren dargestellt werden.

<sup>9</sup>Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009), S. 29 ff.

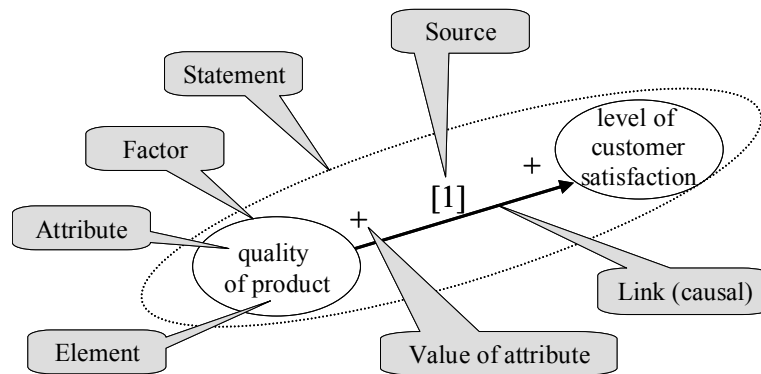
<sup>10</sup>Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009), S. 31 ff.

<sup>11</sup>Vgl. Weinreuter (2011); vgl. Allerkamp (2011)

<sup>12</sup>Zur Prescriptive Study vgl. Blessing / Chakrabarti (2009), S. 33 ff.

<sup>13</sup>Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009)





**Abbildung 1.1** Terminologie zur Modellierung und graphischen Darstellung der Zusammenhänge in der Entwicklungsmethodik. Abbildung entnommen aus Blessing / Chakrabarti (2009), S. 38.

Die Ergebnisse der Descriptive Study I wurden graphisch in einem entsprechenden „Reference Model“<sup>14</sup> dargestellt, vgl. Abbildung 4.14. Daraufhin wurde ein Ansatz zur Unterstützung der Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik erarbeitet. Der Einfluss dieses Ansatzes auf die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik wurde graphisch in einem entsprechenden „Impact Model“ dargestellt, vgl. Abbildung 6.1.

<sup>14</sup>Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009), S. 19 ff.



# 2 Grundlagen und Stand der Forschung

## 2.1 Definition Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik ist eine noch recht junge Disziplin, daher konnte sich noch keine allgemein anerkannte und akzeptierte Definition des Begriffs durchsetzen.<sup>15</sup>

Einen Eindruck über die Bandbreite existierender Definitionen sollen die folgenden Zitate geben:

*„Klein bedeutet hier, dass ein Mikrosystem nicht größer als eine Geldmünze ist.“<sup>16</sup>*

*„[...] nur in einer Dimension im Bereich weniger Mikrometer, während die beiden anderen [Dimensionen] gar im Millimeterbereich liegen [...].“<sup>17</sup>*

*„[...] ist die miniaturisierte Gesamtheit integrierter Sensor-, Signalverarbeitungs- (oder Informationsverarbeitungs-) und Aktorkomponenten mit charakteristischen Abmessungen im Mikrometerbereich.“<sup>18</sup>*

Das Begriffsverständnis am IPEK – Institut für Produktentwicklung orientiert sich hingegen an folgender Definition:

*„Mikrosysteme sind Produkte mit Strukturen im Mikrometer-Bereich, bei denen die Form der Mikrostrukturen die technische Funktion bestimmt. Mikrosysteme vereinen mehrere Mikrokomponenten, die, optimiert zu einem Gesamtsystem, eine oder mehrere spezifische Funktionen erfüllen, in vielen Fällen unter Einbeziehung von Mikroelektronik.“<sup>19</sup>*

## 2.2 Innovation

### 2.2.1 Definition

Schumpeter definiert Innovation *„[...] als die Aufstellung einer neuen Produktionsfunktion [...] Dies umfasst den Fall einer neueren Ware ebensogut wie die Fälle der Erschließung neuer*

---

<sup>15</sup>Fatikow / Rembold (1997), S. 7

<sup>16</sup>Schwesinger et al. (2009), S. 3

<sup>17</sup>Menz (1997), S. 1

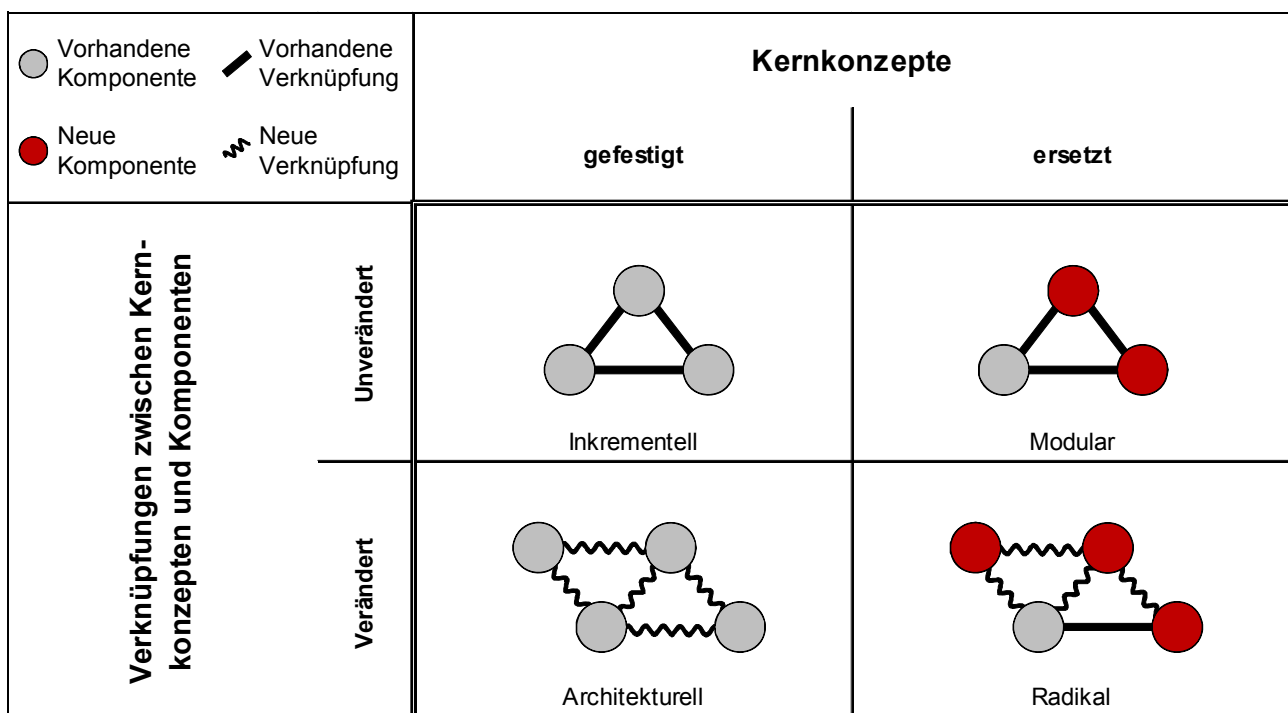
<sup>18</sup>Kasper (2000), S. 5

<sup>19</sup>NEXUS (2002) zitiert nach Kleinkes (2005), S. 19

Märkte oder einer neuen Organisationsform wie einer Fusion.“ Er folgert weiter, dass „[...] die Innovation Faktoren auf eine neue Art kombiniert oder daß sie in der Durchführung neuer Kombinationen besteht [...]“.<sup>20</sup> Weiterhin beschreibt er, dass „[...] die Einfügung neuer Produktionsfunktionen sich so vollzieht, daß sie im Wettbewerb die alten Produktionsfunktionen lebensunfähig machen und ihre Umbildung erzwingen [und] daß nur einige Unternehmungen Innovationen durchführen und dann nach neuen Kostenkurven tätig sein können, während die anderen das nicht können und sich bloß anpassen müssen, häufig, indem sie eingehen.“<sup>21</sup> Basierend auf dieser Auffassung lässt sich der Innovationsbegriff interpretieren als die erfolgreiche Umsetzung einer Invention am Markt.<sup>22</sup>

## 2.2.2 Klassierung von Innovationen

Werden Produkte abstrahiert als Summe einzelner *Komponenten*, die untereinander in einer bestimmten Art und Weise durch *Relationen* miteinander verbunden sind, aufgefasst, können nach HENDERSON und CLARK<sup>23</sup> vier Arten der Produktinnovation unterschieden werden, vgl. Abbildung 2.1.



**Abbildung 2.1** Klassierung von Produktinnovationen nach Henderson und Clark. Eigene Darstellung in Anlehnung an Henderson / Clark (1990)

*Inkrementelle Innovationen* zeichnen sich durch nur geringe Änderungen an den Komponenten oder ihren Relationen aus. Dadurch sind inkrementelle Innovationen gut planbar und

<sup>20</sup>vgl. Schumpeter (1961), S. 95

<sup>21</sup>vgl. Schumpeter (1961), S. 104 f.

<sup>22</sup>Vgl. in ähnlicher Weise auch Albers et al. (2005a)

<sup>23</sup>vgl. Henderson / Clark (1990)

besitzen ein geringes wirtschaftliches Risiko. Die Tragweite und ihr wirtschaftliches Potential sind dabei aber eher gering.

*Modulare Innovationen* ersetzen einzelne Komponenten, die Relationen der Komponenten (also ihr Zusammenspiel im System) bleiben jedoch erhalten. Die Vor- und Nachteile modularer Innovationen entsprechen im Wesentlichen denen der inkrementellen Innovation, erlauben aber bei leicht erhöhtem Risiko eine größere Gestaltungsfreiheit und eine tiefergehende Überarbeitung eines Produkts.

*Radikale Innovationen* hingegen ersetzen sowohl einzelne Komponenten als auch ihre Relationen. Dazu muss bei der Produktentwicklung entsprechend neues Know-how generiert oder akquiriert werden, die Unsicherheit in der Produktentwicklung (keine etablierten Prozesse) und die Unsicherheit des Produkts am Markt sind sehr hoch. Gleichzeitig ist die Tragweite und das wirtschaftliche Potential radikaler Innovationen am höchsten.

Die Neuerung in *Architekturellen Innovationen* schließlich liegt in den neuartigen Relationen schon vorhandener Komponenten begründet. Obwohl die in diesen Produkten genutzten Komponenten bereits bekannt sind, stellt insbesondere die neuartige Verknüpfung dieser Komponenten (und damit die andersartige Funktionserfüllung) etablierte Unternehmen oft vor ernsthafte Herausforderungen, da das architekturelle Know-how des Unternehmens für diese Art der Innovation nicht mehr nützlich ist.

In der Realität sind Produkte allerdings typischerweise zu komplex, um diese lediglich durch eine der vier genannten Kategorien zu charakterisieren. Beispielsweise müsste im Kraftfahrzeugbereich die Entwicklung einer neuen Produktgeneration einer schon zuvor existierenden Modellreihe als inkrementelle oder modulare Innovation klassiert werden, obwohl größenordnungsmäßig 80% aller Teile Neuentwicklungen darstellen und jede Produktgeneration eigene radikale Innovationen beinhaltet. Da diese Art von Innovationen zudem den weitaus größten Teil aller Produktinnovationen ausmachen, prägt ALBERS den Begriff der *Produktgenerationsinnovation*.<sup>24</sup>

In Kapitel 4.1.2 werden die aufgeführten Innovationsarten am Beispiel der Weiterentwicklung einer Gasturbine verdeutlicht.

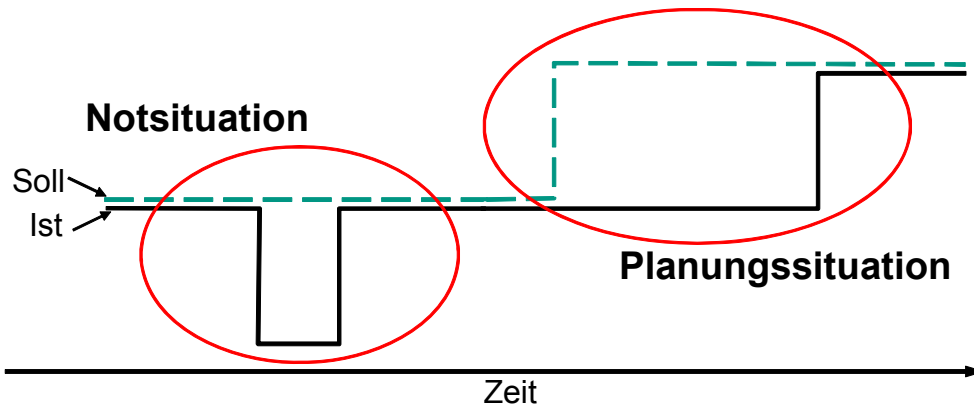
## 2.3 Der Mensch im Mittelpunkt der Produktentwicklung

Der Mensch als Produktentwickler ist vor allem als „Problemlöser der Technik“ tätig. Ein Problem ist nach Dörner gekennzeichnet durch einen unerwünschten Anfangszustand (IST), einen erwünschten Endzustand (SOLL) und eine Barriere, die die Transformation des Anfangszustands in den Endzustand im Moment verhindert.<sup>25</sup>

<sup>24</sup>Ergebnis verschiedener Diskussionen mit ALBERS, zuletzt am 15.08.2012

<sup>25</sup>Vgl. Dörner (1979), S. 10

In der technischen Produktentwicklung definiert ALBERS ein Problem als „*Abweichung eines beliebig unbekanntem IST-Zustands von einem beliebig vagen, gewünschten SOLL-Zustand, wobei der Weg zwischen SOLL und IST zumindest teilweise unbekannt ist.*“<sup>26</sup> Abhängig davon, wie eine Abweichung zwischen SOLL und IST zustande gekommen ist, unterscheidet ALBERS zwischen Not- und Planungssituation, vgl. Abbildung 2.2.<sup>27</sup>



**Abbildung 2.2** Die Art der Abweichung zwischen SOLL und IST definiert die Problemart. Eigene Darstellung in Anlehnung an Albers et al. (2005a).

Dörner führt die Klassierung von Problemtypen auf die Typen von Barrieren zurück, „[...] die die Transformation des Anfangszustandes in den Endzustand verhindern.“<sup>28</sup> Zur Klassifikation der Barrieren nutzt Dörner die Dimensionen „Bekanntheitsgrad der Mittel“ sowie „Klarheit der Zielkriterien“, die resultierenden Barrieren bezeichnet er als „Synthese-“, „Interpolations-“, „dialektische“ sowie „dialektische und Synthesebarriere“, vgl. Abbildung 2.3.<sup>29</sup>

		Klarheit der Zielkriterien	
		hoch	gering
Bekanntheitsgrad der Mittel	hoch	Interpolationsbarriere	dialektische Barriere
	gering	Synthesebarriere	dialektische und Synthesebarriere

**Abbildung 2.3** Klassifikation von Barrieretypen nach Dörner (1979), S. 14

Sind im Gegensatz zum Problem sowohl IST- als auch SOLL-Zustand bekannt und ist

<sup>26</sup>Albers et al. (2005a)

<sup>27</sup>Bei der Notsituation weicht die reale IST-Situation von der angenommenen IST-Situation (in diesem Falle das Soll) ab und muss normalerweise kurzfristig wieder dem SOLL (in diesem Falle das angenommene IST) angepasst werden. Bei der Planungssituation ergibt sich die Abweichung aus einer geplanten Veränderung des SOLL-Zustandes.

<sup>28</sup>Dörner (1979), S. 11 ff.

<sup>29</sup>Vgl. Dörner (1979), S. 14

der Weg zwischen IST und SOLL eindeutig und präzise definiert, sodass er reproduktiv beschritten werden kann, liegt hingegen eine Aufgabe vor.<sup>30</sup>

Ob nun ein Mensch einen Produktentwicklungsprozess oder eine Aktivität innerhalb des Prozesses auffasst als *Problem* oder als *Aufgabe*, hängt im Wesentlichen ab von seinem Vorwissen und seiner Erfahrung, aber auch von den Möglichkeiten, die er zur Unterstützung nutzen kann. Die subjektive Einordnung einer Tätigkeit als Aufgabe oder als Problem beeinflusst die Produktentwicklung dabei grundlegend. Während die Empfindung einer Tätigkeit *als Aufgabe* bei Person „A“ zu Unterforderung und Langeweile führen kann, könnte eine Empfindung der gleichen Tätigkeit *als Problem* von Person „B“ als Herausforderung angesehen werden, die sie zu Höchstleistungen anspornt. Das gleiche Problem könnte von Person „C“ wiederum als unüberwindbare Hürde empfunden werden und zu (Versagens-) Ängsten und langfristig möglicherweise zu Depressionen, Burnout etc. führen.

Weiterhin argumentiert Oerding in Bezug auf die Rolle des Menschen in der Produktentwicklung, dass *„[...] kreative Prozesse [...] nur vom Menschen aus[gehen]. Entscheidungen bei unsicherer Informationslage oder neue Ideen zur Lösungsfindung werden vom Menschen gefällt und initiiert. Der Mensch mit seinen Fähigkeiten ist Mittelpunkt der Produktentstehung. Nur er kann Änderungen an den Subsystemen der Produktentstehung vornehmen.“*<sup>31</sup>

Alle Werkzeuge und Methoden, die die Produktentwicklung unterstützen sollen, müssen also letztlich den Menschen unterstützen. Somit muss immer *der Mensch im Mittelpunkt der Produktentwicklung* berücksichtigt werden. Diese Forderung existierte schon damals und gilt in der heutigen Zeit, in der die Möglichkeiten der computerunterstützten Konstruktion immer umfassender werden und oftmals den Menschen aus dem Mittelpunkt der Konstruktion verdrängen, mehr denn je:

*„Das Erfinden und Machen des Technikers beruht nicht bloß auf Wissenschaft und Handwerk, sondern auch, und zwar in nicht geringem Grade, auf Geistestätigkeiten, die künstlerisch genannt werden müssen.“*<sup>32</sup>

*„Dem Konstrukteur muss die ihm gebührende Rolle im Entwicklungsprozess wiedergegeben werden.“*<sup>33</sup>

*„Der Konstrukteur sollte im Entwicklungsprozess die hauptverantwortliche Person sein.“*<sup>34</sup>

*„Der Konstrukteur darf auf keinen Fall auf Teilgebiete eingeeengt werden, wenn er seinen Beruf mit Freuden und erfolgreich ausfüllen soll.“*<sup>35</sup>

<sup>30</sup>Vgl. Dörner (1979), S. 10

<sup>31</sup>Oerding (2009), S. 112 in Anlehnung an Beer (1973), Kapitel 2.2.3.

<sup>32</sup>Redtenbacher (1859)

<sup>33</sup>Brader (1967)

<sup>34</sup>Pahl (1967)

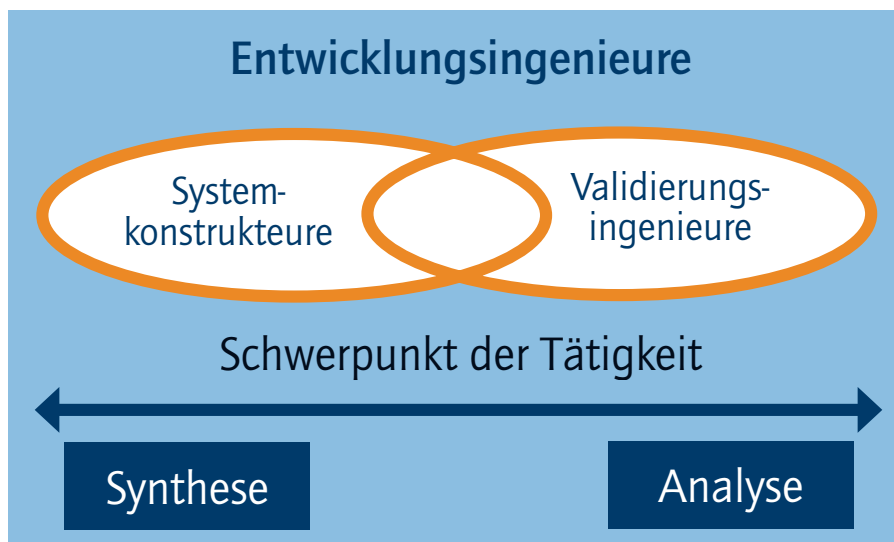
<sup>35</sup>Federn (1970)

„Innovation depends on invention – and inventors should be treated as the pop stars of industry!“<sup>36</sup>

„Der Konstrukteur muss im Mittelpunkt der Produktentwicklung stehen, er muss unterstützt werden in seiner Arbeit als ‚Wissenschaftler und Künstler‘.“<sup>37</sup>

## 2.4 Ingenieur, Entwickler, Konstrukteur?

Bislang werden die Begriffe „Ingenieur“, „Entwickler“ und „Konstrukteur“ in der Öffentlichkeit, im industriellen und wissenschaftlichen Bereich manchmal unterschiedlich, manchmal synonym verwendet. Dadurch verschwimmen die Begriffe und bieten ein diffuses Bild. Aus diesem Grund wurde von der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) eine Studie zum Berufsbild des „Konstruktors“ erstellt, in der Empfehlungen zur Definition und Unterscheidung der Begriffe enthalten sind.<sup>38</sup> So wird vorgeschlagen, den *Systemkonstrukteur*, dessen Fokus auf der Synthese liegt, vom *Validierungsingenieur*, dessen Fokus auf der Analyse liegt, zu unterscheiden. Der Systemkonstrukteur „[...] kennt und berücksichtigt [bei der Synthese eines Systems dessen] Wechselwirkungen mit Sub- und Supersystemen.“ Der Validierungsingenieur kennt und „[...] prüft [bei der Analyse eines Systems] die Wechselwirkungen mit den Sub- und Supersystemen. Beide bilden die Gruppe der Entwicklungsingenieure.“<sup>39</sup>



**Abbildung 2.4** Systemkonstrukteur (v.a. synthetisierend tätig) und Validierungsingenieur (v.a. analysierend tätig) bilden die Gruppe der Entwicklungsingenieure. Abbildung entnommen aus acatech (Hrsg.) (2012), S. 13

Die so getroffene Unterscheidung bedeutet aber nicht, dass ein Systemkonstrukteur nicht mit analysierenden Momenten und ein Validierungsingenieur nicht mit synthetisierenden

<sup>36</sup>Zitat Prinz Philip von Großbritannien u. Nord-Irland (\*1921), Ehemann von Königin Elisabeth II.

<sup>37</sup>Zitat Albert Albers

<sup>38</sup>Vgl. acatech (Hrsg.) (2012), S. 10

<sup>39</sup>Vgl. acatech (Hrsg.) (2012), S. 13



Momenten in seiner Tätigkeit konfrontiert wäre. In Bezug auf den Systemkonstrukteur wird dieses in Abschnitt 4.1 weiter diskutiert und konkretisiert.

Die Empfehlungen von acatech-Studie und acatech-Positionspapier<sup>40</sup> zur Unterscheidung der oben genannten Begriffe werden im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und konsequent umgesetzt. Insbesondere wird der Begriff *Konstruktion* genutzt, wenn der Fokus auf die Systemsynthese gelegt werden soll. Im Gegensatz dazu wird der Begriff *Validierung* genutzt, wenn der Fokus auf der Systemanalyse liegt. Soll das für die Produktentwicklung typische Wechselspiel zwischen Analyse und Synthese betont werden, wird hingegen der Begriff *Entwicklung* genutzt.

Die beschriebene Abgrenzung der Begriffe ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

## 2.5 Konstruktion einer Mikro-Gasturbine

Die vom Verfasser dieser Arbeit geleitete und gemeinsam mit anderen Beteiligten des SFB 499 durchgeführte Entwicklung einer Mikro-Gasturbine<sup>41</sup> wird in der vorliegenden Arbeit als Leitbeispiel genutzt, um die nachfolgenden theoretischen Betrachtungen zu Produktentstehungsprozessen in der Mikrosystemtechnik und die daraus abgeleiteten Konstruktionsbarrieren zu motivieren und anschaulich darzustellen.

### 2.5.1 Zielsetzung der Demonstrationssystementwicklung

Validierung ist die wichtigste Aktivität im Produktentstehungsprozess, da hier der Abgleich zwischen Ziel- und Objektsystem stattfindet und nur durch sie Wissen im Produktentstehungsprozess entsteht.<sup>42</sup> Diese Auffassung der Validierung begründet auch den Sinn und Zweck von Demonstrationssystemen in der Forschung. So wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs 499 (SFB 499) „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“<sup>43</sup> Demonstrationssysteme genutzt, um einerseits neu erforschte Ansätze in Entwicklung, Produktion, Replikation und Qualitätssicherung mechanischer Mikrosysteme anzuwenden und auf ihre Praktikabilität zu überprüfen. Die Übertragung und Anwendung der Erkenntnisse auf ein Demonstrationssystem diene somit als Teil der Validierung dem Wissenserwerb. Andererseits diene die Arbeit mit Demonstrationssystemen dazu, Probleme in Ansätzen, Vorgehensweisen und Prozessen aufzudecken, die wiederum als Quelle neuer Forschungsfragen genutzt werden können.

<sup>40</sup>Vgl. Albers et al. (2012b); acatech (Hrsg.) (2012)

<sup>41</sup>Vgl. Bauer et al. (2010), vgl. Albers et al. (2011c)

<sup>42</sup>vgl. Albers / Muschik (2010) .

<sup>43</sup>vgl. Kraft (2011)

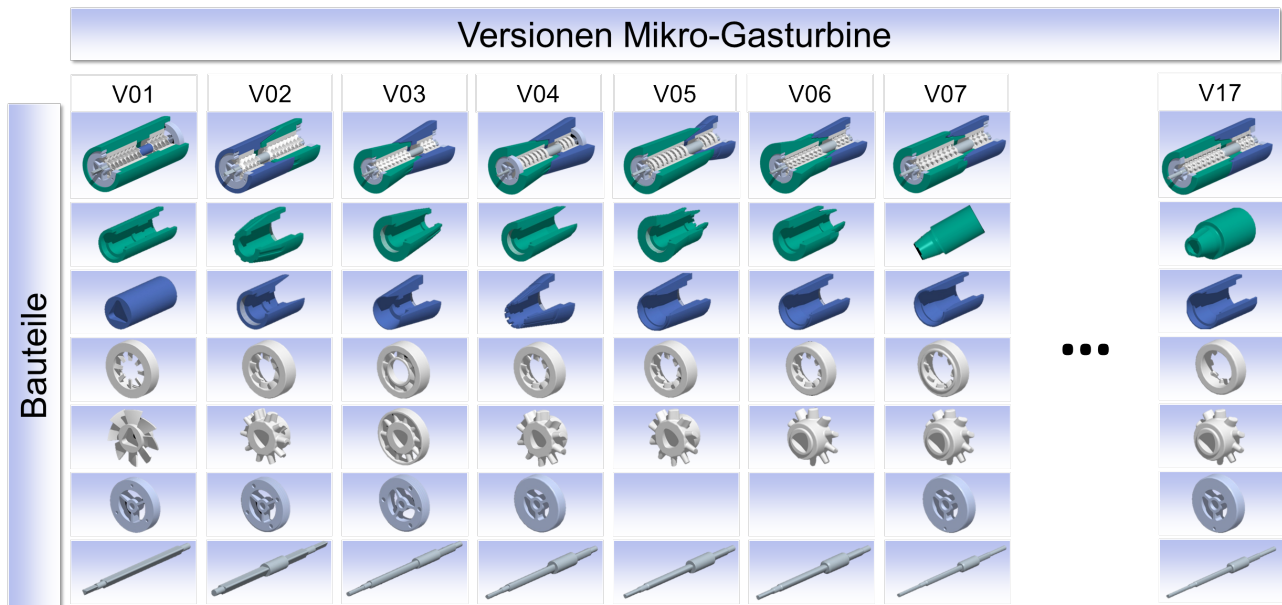
Die mikromechanischen Demonstrationssysteme der ersten beiden Förderphasen, der *Komponenten-* und der *Systemphase*, waren weitgehend durch zweieinhalbdimensionale Geometrien bzw. durch die Aneinanderreihung solcher Geometrien gekennzeichnet. In der dritten Förderphase, der *Komplexitätsphase*, wurden erstmals Demonstrationssysteme entwickelt, die diese Limitierung überwandern und die Herstellbarkeit dreidimensionaler Geometrien darstellten. Ziel der methodischen Entwicklung eines neuen Demonstrationssystems für die vierte sog. *Integrationsphase* war es, neben Komponenten, die durch Mikropulverspritzguss hergestellt wurden, möglichst viele weitere Produktionsverfahren des SFB in die Demonstrationssystemherstellung einzubinden und so möglichst die gesamte Prozesskette des SFB in einem einzigen Demonstrationssystem abzubilden. Außerdem sollten durch erhöhte Bauteilkomplexitäten die Anforderungen an die Werkzeuge und Formeinsätze der genutzten Spritzgussverfahren möglichst stark erhöht werden, um die Grenzen der Machbarkeit dieser Verfahren zu ermitteln.

## 2.5.2 Erfüllung der Zielsetzung

Der SFB 499 gliederte sich in vier wissenschaftliche Projektbereiche *A: Entwicklung*, *B: Prozessvorbereitung*, *C: Produktion*, *D: Werkstoff- und Bauteilverhalten* sowie einen nichtwissenschaftlichen Projektbereich *Z: Dienstleistungen*. Jeder Projektbereich untergliederte sich wiederum in vier bis sechs Teilprojekte A1, A2,... Z4.

Das Demonstrationssystem Mikro-Gasturbine bot ein großes Potential, die durch den SFB bereitgestellte Werkstoffvielfalt und die entwickelten Verbindungstechniken sinnvoll zu nutzen. Die zu erwartenden hohen Betriebstemperaturen in der Brennkammer und im Turbinenteil der Mikro-Gasturbine sowie die durch Zentrifugalkräfte hervorgerufenen mechanischen Belastungen der rotierenden Bauteile motivieren zur Nutzung metallischer Guss- bzw. keramischer Spritzgusswerkstoffe. Weiterhin werden die Vorteile der genutzten Sinterfügeverbindung demonstriert, da diese Verbindungsart ebenfalls hochtemperaturfest ist. Das letztlich realisierte Demonstrationssystem musste soweit vereinfacht werden, dass durch Aneinanderreihung mehrerer Lauf- und Leiträder zwar ein relativ komplexes Gesamtsystem aufgebaut werden konnte, gleichzeitig aber der maximal mögliche Kostenrahmen, den das Forschungsbudget des SFB 499 definierte, nicht verlassen wurde. So wurden die benötigten Lauf- und Leiträder mit je einem Formeinsatz im Mikrospritzgussverfahren realisiert. Dadurch ergab sich ein Demonstrationssystem-Design, das aufgrund fehlender Einengung bzw. Aufweitung des Strömungsquerschnitts im Verdichter- bzw. Turbinenteil nur eine geringe Verdichtung bzw. Entspannung des Fluids entstehen lässt. Die zuvor beschriebene Zielsetzung, die mit dem Demonstrationssystem verfolgt wurde, blieb davon jedoch unbeeinflusst. Hiervon ausgehend wurden bei den prozessvorbereitenden und produzierenden Teilprojekten Anforderungen hinsichtlich einer fertigungsgerechten, handhabungsgerechten und prüfmittelgerechten

Konstruktion ermittelt. Hierzu wurden Expertengespräche sowie die SFB-spezifischen Datenbanken „Strukturenkatalog“ des Teilprojekts *Z3: Mikrofräsen*, der „Microfeaturekatalog“ des Teilprojekts *C4: Microfeatures Qualitätssicherung* sowie das im Teilprojekt *A1: Entwicklungsmethodik* entwickelte „Micro Book of Knowledge“ (MyBoK) genutzt.<sup>44</sup> Erste Ideen wurden wiederum in bilateralen Gesprächen sowie in den Arbeitskreisen des SFBs vorgestellt und diskutiert, so dass spezifische neue Randbedingungen und Anforderungen aufgenommen werden konnten. Die Entwicklung des Demonstrationssystems ist in Abbildung 2.5 dargestellt.



**Abbildung 2.5** Entwicklungsprozess der Mikrogasturbine. Das Gesamtsystem und dessen einzelnen Bauteile wurden in 17 Iterationen an wechselnde Produktionsstrategien der Bauteile adaptiert.

Wiederholte Parameterstudien der Bauteilgeometrien, insbesondere am Lauf- und Leitrad, führten in einem kontinuierlichen Abstimmungsprozess zur letztendlich konzipierten Mikro-Gasturbine (V17), wie in Abbildung 2.6 gezeigt. Diese besteht aus zwei rotationssymmetrischen Gehäuseteilen, die über einen Konus unter Nutzung des Sinterfügens (Teilprojekt C3) miteinander verbunden werden. Die Lauf- und Leiträder aus ZrO<sub>2</sub> werden unter Nutzung des Mikro-Hochdruckspritzguss (Teilprojekt C1), die Lagerschilde aus ZrO<sub>2</sub> durch den Mikro-Niederdruckspritzguss (Teilprojekt A3), die Polygonwellen aus Aluminiumbronze durch Mikroguss (Teilprojekt C2) und die Gehäuseteile aus der Edelstahllegierung 17-4PH durch Mikro-Hochdruckspritzguss (Teilprojekt C3) hergestellt.

### 2.5.3 Herausforderungen in der Umsetzung

Zur Herstellung des **Gehäuses** wurden unterschiedliche Werkzeugkonzepte (v.a. Trennebenen der Formeinsätze) diskutiert. Das Gehäuse wurde aus zwei Gehäusehälften aufgebaut,

<sup>44</sup>Vgl. SFB 499 (2012)

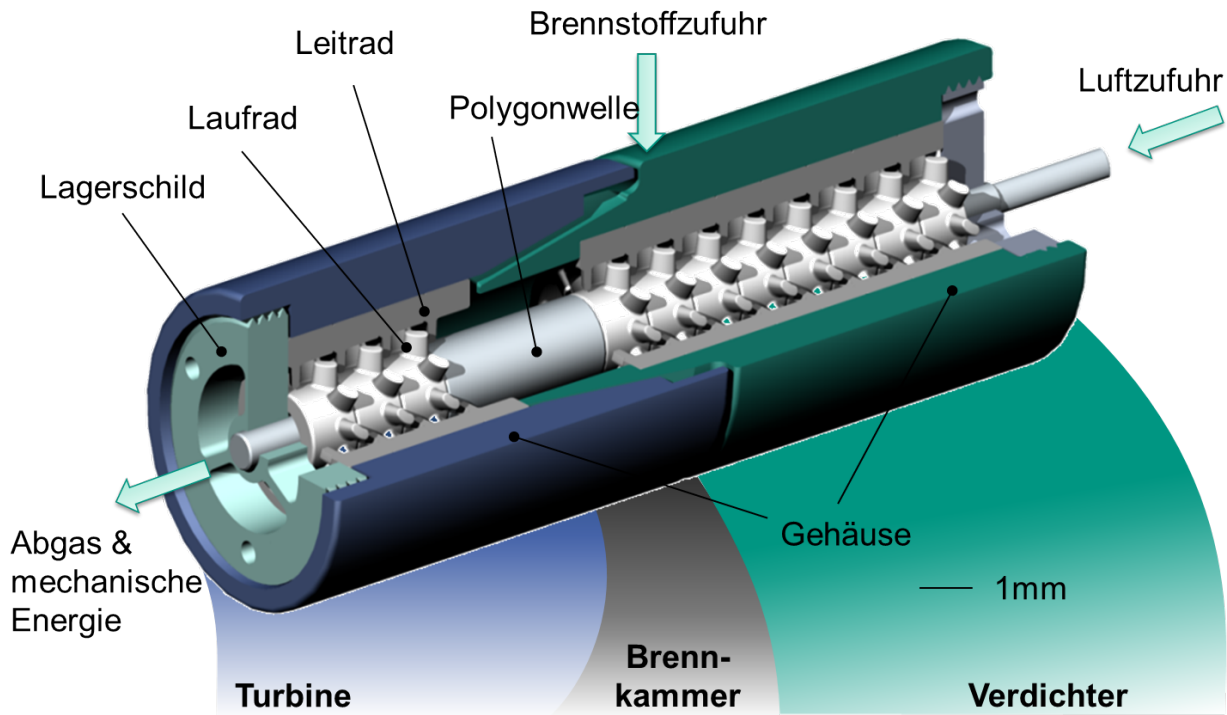


Abbildung 2.6 Mikro-Gasturbine

die so gestaltet wurden, dass Montageabweichungen am sintergefügt Konus auf die generelle Montage und Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems keine Auswirkung hatten. Zusätzlich wurden Brennstoffzuführungen in das Gehäuse eingebracht, die trotz des Sinterfügens am Konus den Zugang von außen zur Brennkammer eröffneten.

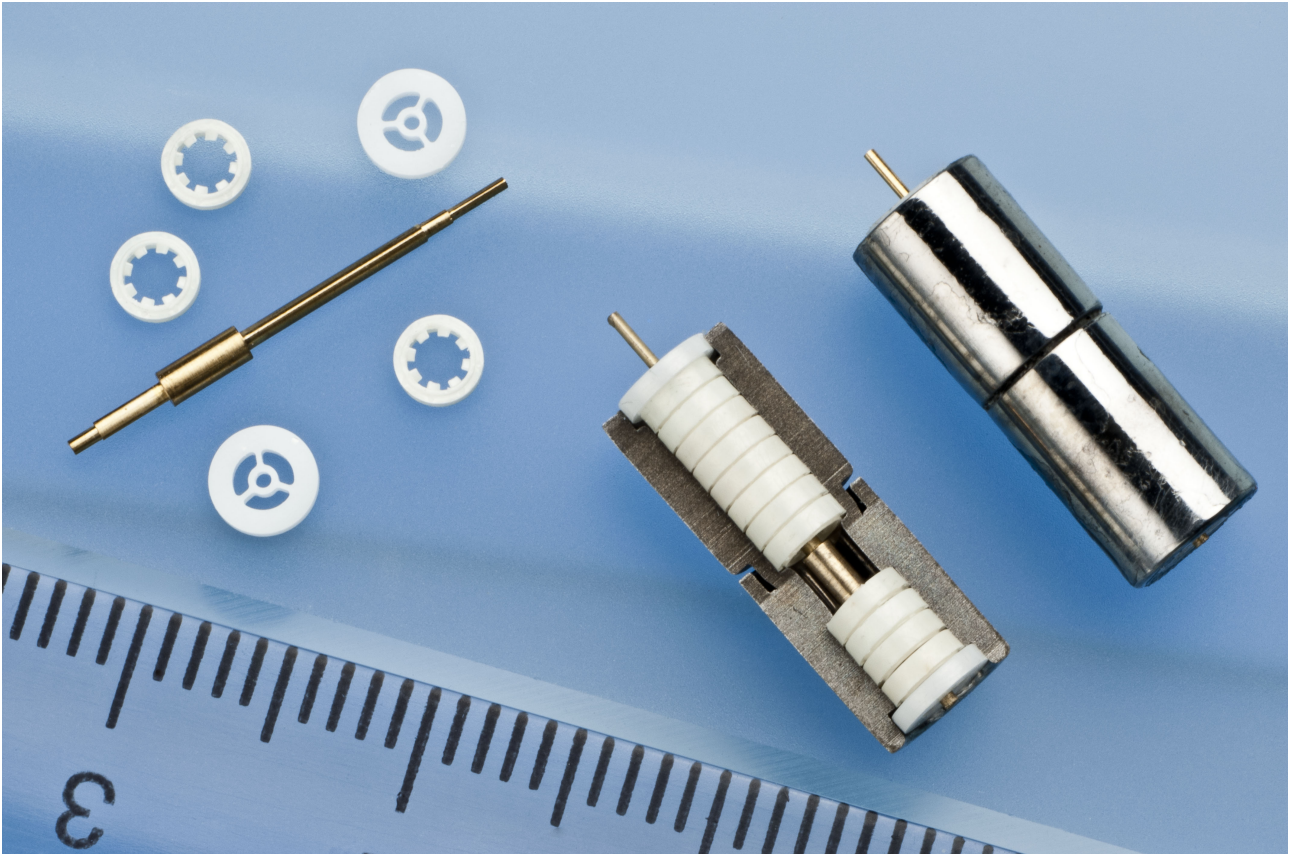
Da von den **Lauf- und Leiträdern** durch ihre Stapelung besonders viele Teile pro Demonstrationssystem benötigt wurden, sollten diese durch den Mikro-Hochdruckspritzguss hergestellt werden. Das Design wurde an die Möglichkeiten dieses Fertigungsverfahrens und an den gewählten Werkstoff angepasst. So mussten konsequent scharfe Kanten und Hinterschneidungen vermieden, geringe Aushebeschrägen eingefügt, Anspritz-/Trennflächen und Positionierflächen vorgesehen werden. Insbesondere die Gestaltung der Trennebenen der Formeinsätze stellte die größten Herausforderungen an die Entwicklung, die aber durch ein neuartiges Werkzeugkonzept, das gemeinsam mit dem Teilprojekt „Mikropulverspritzgießen“ entwickelt wurde, gelöst werden konnten.

Die **Lagerschilde** wurden für die Herstellung per Niederdruckspritzguss optimiert. Die Hinterschneidungen des Gewindes am Außendurchmesser wurden aufgrund der genutzten Silikonformen als herstell- und entformbar eingeschätzt. Über das Gewinde wird das Lagerschild mit dem Gehäuse verschraubt und dient damit als Radial- und Axiallager für die Polygonwelle.

Die **Polygonwelle** nutzt ein P3G-Polygon (sog. Gleichdick), um einerseits eine einfache Montage der Laufräder, andererseits aber auch eine möglichst gute Selbstzentrierung der Laufräder im Betrieb zu gewährleisten. Damit können die Auswirkungen der im Vergleich

zu den Nennmaßen der Bauteile relativ großen geometrischen Abweichungen auf die Funktionalität reduziert werden. Die Polygonwelle besitzt ein Aspektverhältnis von ca. 30, ihr Durchmesser nimmt zu beiden Enden beträchtlich ab. Damit stellte sie hohe Herausforderungen an den Mikroguss und erforderte die Entwicklung eines entsprechenden Angusskonzepts.

Die schließlich realisierten Bauteile und das Demonstrationssystem sind in Abbildung 2.7 dargestellt.<sup>45</sup>



**Abbildung 2.7** Realisiertes Demonstrationssystem „Mikro-Gasturbine“ und dessen Komponenten. Foto mit freundlicher Genehmigung von Herrn Markus Breig

### Mikrospezifische Tolerierung

Eine wesentliche Herausforderung bei der Gestaltmodellierung des Demonstrationssystems war die Toleranzfestlegung (Längen-, Form- & Lagetoleranzen). Hier konnten nicht wie in makroskopischen Systemen üblich beliebige, für die Funktionserfüllung notwendige Toleranzen festgelegt werden. Vielmehr erforderte die Toleranzvergabe ein Umdenken des Konstrukteurs, da hier die Fertigungsverfahren Grenzwerte für realisierbare Toleranzen lieferten, die eingehalten werden mussten. Diese so gewonnenen minimal möglichen Toleranzen waren aber oftmals noch immer zu groß, um die Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Durch entsprechende Gestaltung konnte die Funktion sichergestellt und die zu erwartenden relativ großen

<sup>45</sup>Mit freundlicher Genehmigung von Herrn Markus Breig (2012)

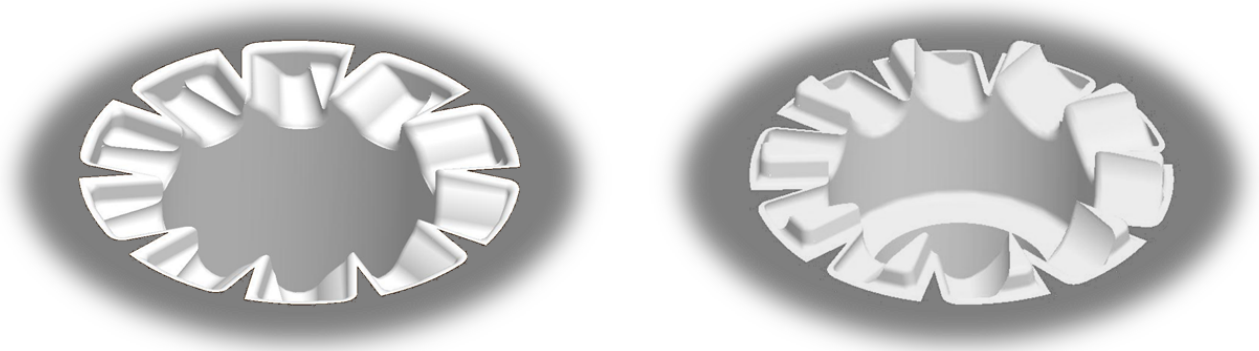
Fertigungsabweichungen akzeptiert werden. Ein Beispiel hierfür war die Gestaltung der Welle-Nabe-Verbindung zwischen Polygonwelle und Laufrad, die durch die Ausführung als P3G-Gleichdickprofil die Fertigungsabweichungen größtenteils ausgleichen konnte. Die benötigte genaue koaxiale Positionierung der Polygonwelle und der Laufräder zueinander konnte dadurch trotz möglicherweise relativ großer Spaltweiten erreicht werden. Da alle Bauteile abformend hergestellt wurden, ergaben sich Prozessverkettungen aus Einzelprozessen, die jeweils spezifische minimale Abweichungen besitzen und ebenfalls miteinander kombiniert werden mussten. Zusätzlich mussten die Bauteile skaliert werden, um thermische Dehnungen beim Abkühlen (z.B. Mikroguss, Mikro-Hochdruckspritzguss) und/oder Sinterschwund (Niederdruckspritzguss, Mikro-Hochdruckspritzguss) auszugleichen und das gewünschte Endmaß am Bauteil zu erhalten. Danach wurden die Bauteile samt ihrer Toleranzen wieder herunterskaliert, um die aufsummierten und herunterskalierten Endabweichungen am Demonstrationssystembauteil zu erhalten. Damit konnten deren Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit abgeschätzt werden. Dieses Vorgehen wurde iterativ angewandt, um zu einer funktionsoptimalen Aufteilung der Toleranzen auf die einzelnen Bauteile und Prozessschritte zu gelangen.

### **Trennebenen**

Eine weitere wesentliche Herausforderung in der Demonstrationssystementwicklung stellte die Entwicklung der Formeinsätze für Lauf- und Leitrad dar. Durch die dreidimensionalen Freiformflächen der Verdichter- und Turbinenschaufeln, vgl. Abbildung 2.8, konnte die Teilung der Formeinsätze im Gegensatz zu sämtlichen bisher verwendeten Formeinsätzen nicht mehr über eine ebene Trennfläche erfolgen. Diese aus vielen kleinen Sub-Trennflächen zusammengesetzte Teilung stellte höchste Anforderungen an die Präzision während der Fertigung, da die Trennflächen nicht mehr wie bei ebenen Trennflächen nachträglich auf Maß geschliffen werden konnten. Zusätzlich erfolgte die Formeinsatztrennung nicht nur über waagerechte, sondern notwendigerweise auch über senkrechte bzw. schräge Trennflächen. Trotz dieser komplexen Formeinsatztrennflächen musste für eine erfolgreiche Abformung sichergestellt werden, dass der Feedstock beim Spritzvorgang zwar die Kavität optimal füllt, gleichzeitig aber nicht zwischen die Trennflächen tritt. Dadurch würden die Trennflächen beschädigt und die weitere Abformung mit den Formeinsätzen unmöglich. Hierfür wurde in Kooperation mit Teilprojekt *C1: Mikropulverspritzguss* ein entsprechendes neuartiges Werkzeugkonzept entwickelt.

### **Neuartiges Werkzeugkonzept**

Die Werkzeugentwicklung - dabei insbesondere der Mechanismus zur Ausrichtung der beiden Formeinsatzhälften - war getrieben durch einen Widerspruch. Die Formeinsatzhälften



**Abbildung 2.8** Trennebenen am Formeinsatz des Laufrades.

mussten im Spritzgusswerkzeug möglichst exakt aufeinander ausgerichtet werden, um beim Spritzgussvorgang das Eindringen des Feedstocks zwischen die Trennflächen zu vermeiden (Forderung nach Spaltfreiheit). Gleichzeitig musste sichergestellt werden, dass die Strukturen der beiden Formeinsatzhälften beim Schließen des Spritzgusswerkzeugs nicht durch gegenseitige Kollision beschädigt werden (Forderung nach Spiel). Diese konkurrierenden Zielsetzungen konnten durch ein entsprechendes Werkzeugkonzept, das in Kooperation mit Teilprojekt C1 entwickelt wurde, erfüllt werden. Es ermöglicht ein Schließen des Werkzeugs bei um wenige Winkelgrad zueinander verdrehten Formeinsätzen. Dadurch konnten die über die Hauptebene einer Formeinsatzhälfte herausragenden Strukturen (die „kronenartigen“ Strukturen) mit ausreichender Sicherheit in die Kavitäten der gegenüberliegenden Formeinsatzhälfte eintauchen. Durch eine entsprechende Mechanik in einer der beiden Werkzeughälften wird erst kurz vor dem vollständigen Schließen des Werkzeugs der Winkelversatz wieder kontinuierlich reduziert, bis sowohl senkrechte als auch waagerechte Sub-Trennflächen in Kontakt kommen. Die Trennfuge kann im geschlossenen Werkzeug somit auf ein Minimum reduziert werden, vgl. Abbildungen 2.9 und 2.10<sup>46</sup>.

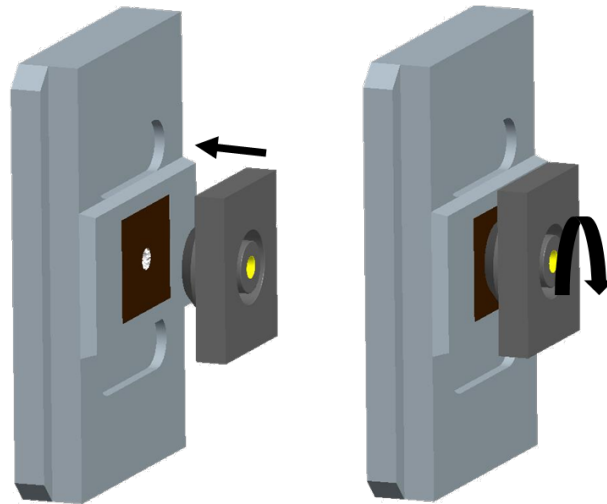
### 2.5.4 Zwischenfazit

Das an ähnlichen Systemen der Makrowelt orientierte Design der Mikro-Gasturbine impliziert verschiedene Probleme, die den realen Betrieb dieses Systems im Mikrobereich erheblich erschweren würden. Beispielsweise werden die relativen Verluste (Spalt-, Strömungsverluste,...) mit abnehmendem Durchmesser immer größer. Dies ist ein Grund, weshalb man mit abnehmendem Durchmesser von der axialen über eine axial-radiale zu einer radialen Bauweise einer Strömungsmaschine übergeht, da dann zusätzlich Zentrifugalkräfte zur Verdichtung ausgenutzt werden können.<sup>47</sup>

Zusätzlich wurde dem Verfasser dieser Arbeit bewusst, dass er immer wieder Probleme

<sup>46</sup>Mit freundlicher Genehmigung von Herrn Markus Breig (2012)

<sup>47</sup>Vgl. Cordier (1953) zitiert in Bohl / Elmendorf (2008), S. 77.



**Abbildung 2.9** Neuartiges Werkzeugkonzept, das kollisionsfreies Schließen des Werkzeugs trotz komplexer Trennebenen des Formeinsatzes erlaubt.



**Abbildung 2.10** Der Formeinsatz für das Leitrad mit komplexen Trennebenen und Dreh-Schließmechanismus (Bildmitte: Urmodell Lagerschild). Foto mit freundlicher Genehmigung von Herrn Markus Breig (2012).



hatte, die Funktionsweise bestimmter Arten von Mikrosystemen in der Systemanalyse zu verstehen – und das trotz der mehrjährigen, intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik während der Bearbeitung des Teilprojekts „Entwicklungsmethodik“ im Rahmen des SFB 499 und der Entwicklung verschiedener Mikrosysteme. Im wesentlichen unterschieden sich diese „andersartigen“ Mikrosysteme durch die zu ihrer Herstellung genutzten Produktionstechnologien.

## 2.6 Produktentwicklungsprozesse

Die Mikrosystemtechnik zeichnet sich dadurch aus, dass eine gewollte Funktionalität realisiert wird durch die enge Verknüpfung von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik auf kleinstem Raum. Die Systemkonstrukteure entstammen diesen und weiteren Disziplinen, vgl. Abschnitt 2.7.5. Um disziplinspezifische Denk- und Vorgehensweisen verstehen zu können, die die Mikrosystemtechnik prägen, sollen im Folgenden die disziplinspezifische Produktentwicklung nachvollzogen und entsprechende Modellvorstellungen beschrieben werden. In Kapitel 4.3 kann auf Basis dieser Erkenntnisse eine mikrospezifische Hürde in der Entwicklung mikrotechnischer Systeme – die Disziplinbarriere – hergeleitet und beschrieben werden.

### 2.6.1 Maschinenbau

Kennzeichnend für den Entwicklungsprozess maschinenbaulicher Produkte ist dessen Prägung durch den Menschen, der die kreative Synthese technischer Systeme betreibt. Prozesse, die Aktivitäten beinhalten, deren erfolgreiche Durchführung stark abhängig ist von kreativem Input, sind typischerweise gekennzeichnet durch das iterative Durchlaufen dieser Aktivitäten. Die Iteration wird erst beendet, wenn die Bearbeitung der nachfolgenden Aktivitäten auf Basis der erzielten Ergebnisse erfolgreich erscheint. Dadurch lassen sich diese Prozesse nur bedingt auf Basis verschiedener Phasen in ihrem Ablauf beschreiben und planen. In der Folge existieren verschiedene Auffassungen, wie Entwicklungsprozesse maschinenbaulicher Produkte beschrieben werden können.<sup>48</sup> Um hier dennoch einen Überblick und einen Eindruck über das prinzipielle Vorgehen in maschinenbaulichen Entwicklungsprozessen zu erhalten, sollen verschiedene etablierte Vorgehensmodelle vergleichend betrachtet werden.

---

<sup>48</sup>Schon an dieser Stelle soll vorweggenommen werden, dass es *den* Produktentwicklungsprozess nicht geben kann, da jeder Entwicklungsprozess einzigartig und individuell ist, vgl. Albers (2010).

## Konstruktionsarten

Typischerweise können drei Konstruktionsarten voneinander unterschieden werden: die Neu-, die Anpassungs- und die Variantenkonstruktion.<sup>49</sup> Die *Neukonstruktion* erfüllt „[...] neue Aufgaben und Probleme [...] mit neuen oder Neukombination bekannter Lösungsprinzipien [...]“.<sup>50</sup> Sowohl PAHL als auch EHRENSPIEL verspüren den Bedarf einer weiteren Differenzierung dieses Begriffs, eine weitere Definition erfolgt aber nicht.<sup>51</sup> Eine Möglichkeit, Unterarten der Neukonstruktion zu differenzieren ergibt sich aus der Adaption des Konzepts von HENDERSON und CLARK<sup>52</sup> zur Unterscheidung verschiedener Innovationsarten, vgl. Abschnitt 2.2. Damit ließen sich modulare, architekturelle sowie radikale Neukonstruktionen definieren und unterscheiden.

Weitere Konstruktionsarten sind die *Anpassungskonstruktion*, bei der „das Lösungsprinzip [...] erhalten [bleibt], lediglich die Gestaltung wird an neue Randbedingungen angepasst“<sup>53</sup> und die *Variantenkonstruktion*, bei der „[...] die Größe und/oder Anordnung von Teilen und Baugruppen variiert[...]“<sup>54</sup> werden.

Der Beschreibung maschinenbaulicher Produktentwicklungsprozesse soll im weiteren die Konstruktionsart „Neukonstruktion“<sup>55</sup> bzw. nach ALBERS die „Produktgenerationsinnovation“<sup>56</sup> zugrunde liegen, da diese im Allgemeinen die größte Bearbeitungstiefe erfordern und dabei typischerweise alle Aktivitäten der Produktentwicklung aufs Neue durchlaufen, während Anpassungs- und Variantenkonstruktionen schwerpunktmäßig nur eine Teilmenge der Aktivitäten der Produktentwicklung durchlaufen<sup>57</sup>.

## Der Zweck

Zunächst stellt sich zu Beginn eines Produktentwicklungsprozesses die Frage, was überhaupt entwickelt werden soll. Dazu müssen Produktpotentiale aus den Bedarfssituationen des Marktes abgeleitet werden.<sup>58</sup> Das „ Klären der Aufgabenstellung“, die „Stellung der Aufgabe“ oder die „Aufgabenformulierungsphase“, wie es ROTH, PAHL UND BEITZ, KOLLER, RODENACKER formulieren, lassen sich ebenfalls in dieser Aktivität verorten. Ziel dieser Aktivität ist es, eine „[...] Vorstellung über den Zweck, den das zu konstruierende Produkt erfüllen soll [...]“, zu

<sup>49</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 4 und S. 91; vgl. Ehrlenspiel (2007), S. 256 ff.

<sup>50</sup>Pahl et al. (2005), S. 91

<sup>51</sup>EHRENSPIEL grenzt dabei „[...] wirklich innovative Neukonstruktionen [...]“ ab, Ehrlenspiel (2007), S. 258; PAHL nennt „Invention“ und „Innovation“ zur weiteren Differenzierung, allerdings widerspricht diese Differenzierung der Auffassung des Verfassers dieser Arbeit und der Begriffsdefinition in Abschnitt 2.2.

<sup>52</sup>Henderson / Clark (1990)

<sup>53</sup>Pahl et al. (2005), S. 91

<sup>54</sup>Pahl et al. (2005), S. 91

<sup>55</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 4 und S. 91; vgl. Ehrlenspiel (2007), S. 256 ff.

<sup>56</sup>Vgl. Abschnitt 2.2.2

<sup>57</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 4 und S. 91; vgl. Ehrlenspiel (2007), S. 256 ff.

<sup>58</sup>Vgl. Albers et al. (2010c)

gewinnen.<sup>59</sup>

Marktstudien und -analysen, die im industriellen Umfeld oft durch das Marketing erstellt werden, liefern unter anderem Hinweise zu allgemeinen Trends und zu spezifischen Quellen von Kundenunzufriedenheit beim Umgang mit bestimmten technischen Produkten.

Zusätzlich dient die Nutzungs- und Abbauanalyse von bereits existierenden Produkten durch den Produktentwickler dazu, technische Schwächen eines Produkts zu erkennen, weitere Bedürfnisse des Kunden abzuleiten und festzulegen, wie das Lebensdauerende eines Produkts gestaltet wird.<sup>60</sup>

Unter der Annahme, dass die *„Entwicklungs-/Konstruktionsabteilungen [...] ihre Aufgaben von anderen Unternehmensbereichen [erhalten], dabei wird im Allgemeinen die Aufgabenstellung an die Konstruktion oder an die Entwicklung [...] herangetragen“*<sup>61</sup>, lässt sich das Ergebnis der hier beschriebenen Aktivität in Form einer Anforderungsliste<sup>62</sup> zusammenfassen. Die Anforderungsliste dient dazu, den Zweck des zu entwickelnden Produkts unter Definition der kundenseitig erwarteten und auszuschließenden Eigenschaften zu beschreiben.<sup>63</sup>

In einer Vielzahl unterschiedlicher Produktentwicklungsprojekte, die der Verfasser der vorliegenden Arbeit in Kooperation mit verschiedenen Industrieunternehmen durchgeführt hat, zeigte sich hingegen, dass die oben geäußerte Auffassung zu kurz greift und einen wesentlichen Aspekt heutiger Produktentwicklungsprozesse ausblendet. So ist es oftmals eine typische Tätigkeit des Systemkonstruktors, sich die Aufgabe selbst zu suchen und Innovationspotential zu erkennen. Dieses macht er idealerweise im Team unter Beteiligung von Experten anderer Unternehmensbereiche.<sup>64</sup> Ziel ist es in diesem Fall, zunächst ein Produktprofil zu formulieren, das abstrakte Eigenschaften definiert, ohne konkrete Vorgaben in Bezug auf Technologie und Gestalt zu machen<sup>65, 66</sup>.

## Die Mittel

Der Systemkonstrukteur kann, um die im Produktprofil definierten Eigenschaften zu konkretisieren, nach KOLLER von folgenden Ansatzpunkten ausgehen und diese variieren<sup>67</sup>:

- Funktionen
- physikalische Effekte (bzw. Wirkprinzipien)

---

<sup>59</sup>Koller / Kastrup (1994), S. 1

<sup>60</sup>Vgl. Albers / Braun (2011b)

<sup>61</sup>Pahl et al. (2005), S. 187

<sup>62</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 187 ff.; ROTH; VDI 2221 (1993)

<sup>63</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 187.

<sup>64</sup>vgl. Core-Team-Management in Abschnitt 7.2

<sup>65</sup>Dadurch erklärt sich auch die Bezeichnung „Produktprofil“: die Umrisse des Produkts sind zwar schon schemenhaft zu erkennen, das Produkt selbst ist aber noch nicht sichtbar

<sup>66</sup>Der Begriff „Produktprofil“ wurde ursprünglich durch ALBERS geprägt, vgl. Albers / Meboldt (2007)

<sup>67</sup>Koller / Kastrup (1994), S. 2

- Effektträger (Werkstoffe)
- Gestaltelemente, deren Strukturen und Parameterwerte sowie
- Oberflächen- und
- Energiearten und deren Zustandsparameterwerte

ALBERS<sup>68</sup> bezeichnet diese Aktivität als „Ideenfindung“, die eine ganzheitliche Beschreibung einer Lösungsidee für eine bestimmte Hauptfunktion liefert.

Andere Modelle fassen die Ideenfindung nicht als separate Aktivität, sondern als Teil anderer Aktivitäten auf. So beschreibt KOLLER den „ersten Konstruktionsschritt“, in dem es darum geht, das Kern- oder Hauptproblem zu erkennen „*und eine physikalische Tätigkeit zu finden, mit welcher diese [...] erfüllt werden kann*“<sup>69</sup>, zwar inhaltlich ähnlich zur Aktivität Ideenfindung. Er bezeichnet diesen Konstruktionsschritt dann aber als „Funktions- oder Funktionsstruktursynthese“ und fasst diese Tätigkeit als Teil der Aufstellung von Funktionsstrukturen auf.

Die gefundenen Ideen müssen daraufhin weiter konkretisiert werden. Zur Beschreibung und Modellierung dieser Konkretisierung nutzt die Konstruktionsmethodik die Begriffe „Funktion“ und „Gestalt“ bzw. ähnliche Begriffe, mit denen inhaltlich das gleiche gemeint ist. In der Funktion ist der *Zweck* enthalten, den ein technisches Artefakt erfüllt, während die Gestalt das *Mittel* abbildet, wie dieser Zweck konkret erreicht wird.<sup>70</sup>

## Entwicklung der Funktionsstruktur

Klassischerweise existiert in der Konstruktionsmethodik die Auffassung, dass zunächst ausgehend von einer gewünschten Hauptfunktion die benötigten Subfunktionen identifiziert und zueinander in Relation gesetzt werden müssen. VDI 2221 sowie PAHL und BEITZ bezeichnen diese Aktivität als „Konzipieren“, KOLLER als „Funktions(struktur)synthese“, ROTH als „Funktionelle Phase“, etc. Ziel dieser Aktivität ist es, eine Funktionsstruktur – z.B. in Form eines Funktionsbaums – zu erstellen, der es ermöglicht, das Produkt möglichst abstrakt und gestaltfrei zu beschreiben. Dadurch soll das Finden von Lösungen erleichtert werden, da die Lösungen für Teilfunktionen gesondert erarbeitet werden können und somit die Bearbeitung weniger komplex wird.<sup>71</sup> PAHL und BEITZ sehen die Zielsetzung des „Konzipierens“ in der prinzipiellen Festlegung einer Lösung.<sup>72</sup>

---

<sup>68</sup>vgl. Albers / Braun (2011b)

<sup>69</sup>Koller / Kastrup (1994), S. 2

<sup>70</sup>Vgl. Alink (2010), S.24f.

<sup>71</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 49

<sup>72</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 171 f.

## Entwicklung der Produktgestalt

Die Überführung der Lösungsprinzipien und Funktionsstrukturen in eine geometrisch-stoffliche Gestalt muss immer an den Grundregeln der Gestaltung ausgerichtet sein. *„Ihre Nichtbeachtung führt zu mehr oder weniger großen Nachteilen, Fehlern, Schäden oder gar Unglücken [...]“*<sup>73</sup> an Mensch und Maschine. Diese Grundregeln lauten:

- Eindeutig – abgeleitet aus der Forderung nach Erfüllung der technischen Funktion
- Einfach – abgeleitet aus der Forderung nach einer wirtschaftlichen Realisierung
- Sicher – abgeleitet aus der Forderung nach Sicherheit für Mensch und Umwelt

Zusätzlich zu den Grundregeln bieten Gestaltungsprinzipien Leitlinien für die Gestaltung unter bestimmten Zielsetzungen und Randbedingungen. Diese Gestaltungsprinzipien können sich gegenseitig ausschließen oder widersprechen und stellen *„[...] lediglich zu wählende Strategien [dar], die nur unter bestimmten Voraussetzungen zweckmäßig sind. Der Konstrukteur [...] muss je nach Problemlage unter den konkurrierenden Gesichtspunkten abwägen und sich dann für die am besten geeigneten Gestaltungsprinzipien entscheiden.“*<sup>74</sup> Beispiele für Gestaltungsprinzipien sind in den Prinzipien der Kraftleitung (direkt, kurz, etc.), Prinzipien der Selbsthilfe (selbstverstärkend, selbstausgleichend, etc.), etc. gegeben.

Die Lösungssuche ist, basierend auf der möglichst abstrakt-gestaltfreien Formulierung der Funktionsstruktur eines Produktes aus der vorhergehenden Aktivität, minimal eingeschränkt und bietet so die Möglichkeit, möglichst umfassend nach Gestaltungsmöglichkeiten und deren Kombinationen zu suchen. *„Die einzelnen Teilfunktionen, die zunächst durch den angenommenen 'Schwarzen Kasten' dargestellt wurden, werden nun durch eine konkretere Aussage [den Wirkzusammenhang, der auf physikalischen Effekten und geometrisch-stofflichen Merkmalen beruht] ersetzt.“*<sup>75</sup>

Auch für diese Aktivität wurden trotz inhaltlich weitgehender Ähnlichkeit unterschiedliche Begriffe – „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“<sup>76</sup>, „Gestalten“ (Form- und Herstellungsgestaltung)<sup>77</sup>, „Qualitative“ und „quantitative Synthese“<sup>78</sup>, „Festlegung der Gesamtkonstruktion“<sup>79</sup> – geprägt.

## Prinzip- und Gestaltmodellierung

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Entwicklungsmethodik führten zu einer modifizierten Modellvorstellung bezüglich des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt. Während klassische Auffassungen die Erstellung der Funktionsstruktur und die darauf

<sup>73</sup>Pahl et al. (2005), S. 285 ff.

<sup>74</sup>Pahl et al. (2005), S. 326

<sup>75</sup>Pahl et al. (2005), S. 50

<sup>76</sup>Vgl. VDI 2221 (1993); Pahl et al. (2005), S. 172 f.

<sup>77</sup>Vgl. Roth (1982), S. 22 ff.

<sup>78</sup>Vgl. Koller / Kastrup (1994), S. 4 f.

<sup>79</sup>Vgl. Rodenacker (1991)

aufbauende Gestaltsynthese als voneinander separiert betrachten und modellieren (s.o.), fasst ALBERS – ausgehend von der Erkenntnis, dass der weitaus überwiegende Anteil aller Entwicklungen den Produktgenerationsentwicklungen zuzuordnen sind – die Behandlung von Funktion und Gestalt in der maschinenbaulichen Produktentwicklung als untrennbar miteinander verknüpft auf<sup>80</sup>. Für diese geänderte Auffassung gibt es zwei Gründe: *Ökonomisch* betrachtet ist es nicht sinnvoll, generell „bei Null“ mit der Synthese eines Produktes anzufangen. Das Aufbauen auf bereits vorhandenen Lösungen und deren Funktionsstrukturen (z.B. orientiert an Vorgänger- oder Konkurrenzprodukten) stellt oftmals schon implizit die Nutzung vorhandenen Firmen-Know-hows sicher und ermöglicht eine zeiteffiziente Entwicklung. *Kognitionspsychologisch* betrachtet ist es zudem gar nicht möglich, eine Funktionsstruktur völlig gestaltfrei zu „erdenken“ und zu entwickeln<sup>81</sup>, ohne dabei bildhaft zu denken und sich an bereits vorhandenen technischen Systemen zu orientieren<sup>82</sup>. Konsequenterweise modelliert ALBERS im „Integrierten Produktentstehungs-Modell“ (iPeM) die Prinzip- und Gestaltmodellierung als *eine* Aktivität, vgl. Abschnitt 2.6.1 und entwickelt zur Verknüpfung von Funktion und Gestalt in Analyse und Synthese technischer Systeme den „Contact-, Channel- und Connector-Ansatz“ (C&C<sup>2</sup>-A), vgl. Abschnitt 6.2.3.<sup>83</sup>

## Überprüfung realisierter Funktions-Gestaltzusammenhänge

Die bislang beschriebenen Aktivitäten sind vor allem durch die kreative Synthese gekennzeichnet. Parallel zu diesen Aktivitäten muss für eine zielgerichtete Produktentwicklung die Analyse und Bewertung erzielter Ergebnisse (z.B. Teilsysteme, Vorgehensweisen, etc.) stattfinden. Diese Parallelisierung und die Gleichwertigkeit von Synthese und Analyse ist sehr deutlich z.B. im Konstruktionsprozess nach Koller<sup>84</sup> dargestellt. In anderen Modellen ist die Analyse implizit in den Möglichkeiten des iterativen Vor- und Zurückspringens<sup>85</sup> im Prozess enthalten, das nur über die Analyse ausgelöst bzw. gesteuert werden kann<sup>86</sup>. ALBERS verankert die Analyse konsequenterweise als eigene Aktivität „Validierung“ im Produktentwicklungsprozess und vertritt die Auffassung, dass allein durch die Validierung Erkenntnis und Wissen in der Produktentwicklung entsteht.<sup>87</sup> Kennzeichnend für die Validierung ist dabei, dass sie im Laufe eines Produktentstehungsprozesses immer wiederkehrend durchlaufen wird und dadurch die

<sup>80</sup>Vgl. Albers / Muschik (2010); vgl. Albers / Braun (2011b)

<sup>81</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2007), S. 120: „[...] erfolgt die Lösungssuche überwiegend aus dem Gedächtnis. Auch die Initiative zur Suche in [...] Unterlagen geht von einer im Gedächtnis gespeicherten, meist vagen Ergebnisvorstellung aus. Es müssen also Fakten (Bilder, Abläufe, Zusammenhänge) im Gedächtnis gespeichert sein“

<sup>82</sup>Die Relevanz des bildlich-räumlichen Denkens in der kreativen Synthese wird in Kapitel 4 genauer diskutiert.

<sup>83</sup>Vgl. Albers et al. (2004); Albers et al. (2005b); Alink (2005)

<sup>84</sup>Vgl. Koller / Kastrup (1994), S. 5

<sup>85</sup>Vgl. Müller 1990, S. 99 f.; vgl. Dörner 1994, S. 159 zitiert in Marz (2005)

<sup>86</sup>Vgl. VDI 2221 (1993); vgl. Pahl et al. (2005), S. 283: „Das Gestalten ist durch einen stets wiederkehrenden Überlegungs und Überprüfungsvorgang gekennzeichnet [...]“

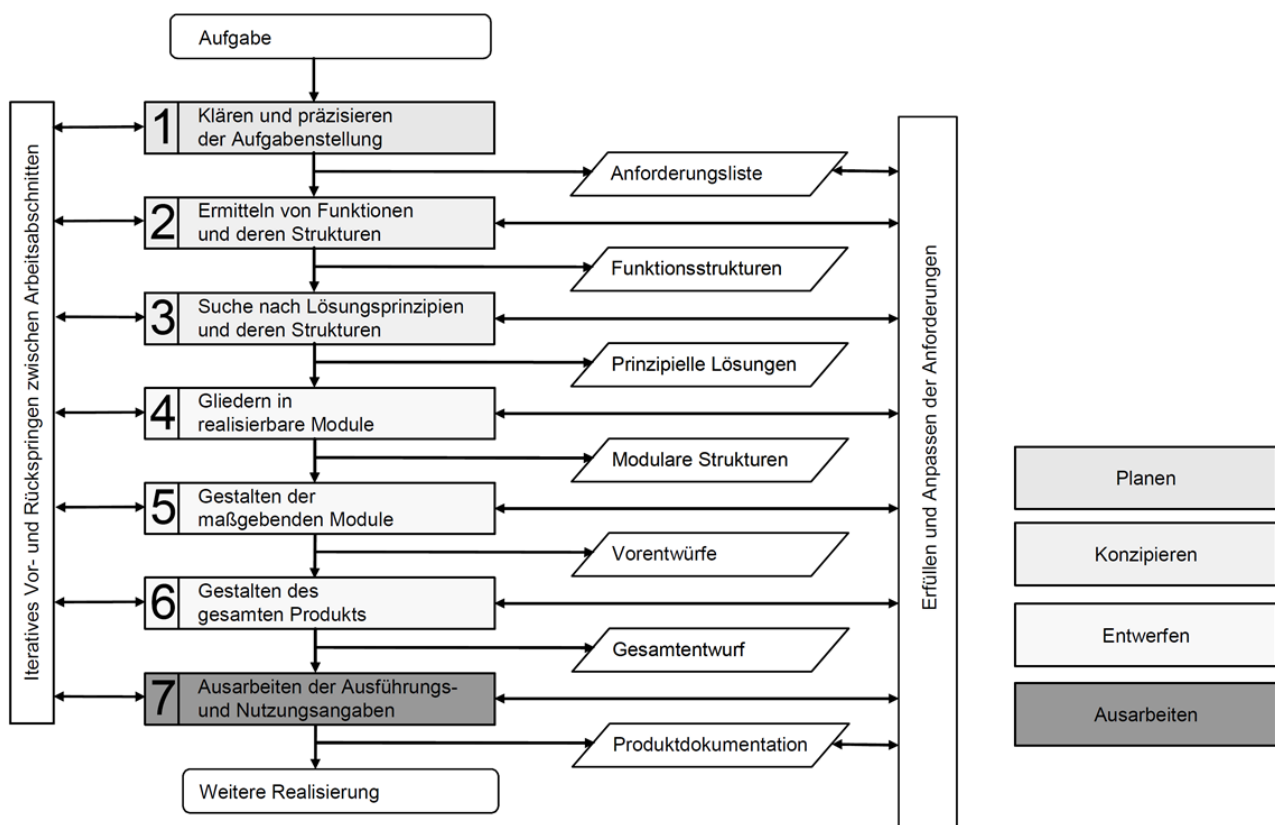
<sup>87</sup>Vgl. Albers (2010)

kontinuierliche Angleichung vom IST- an den SOLL-Zustand ermöglicht.

### Modellierung maschinenbaulicher Produktentwicklungsprozesse

An dieser Stelle werden nur wenige ausgewählte Möglichkeiten und Ansätze zur Modellierung maschinenbaulicher Produktentwicklungsprozesse dargestellt, um in Kapitel 4 die grundlegenden Unterschiede zu Produktentwicklungsprozessen anderer Disziplinen diskutieren zu können.

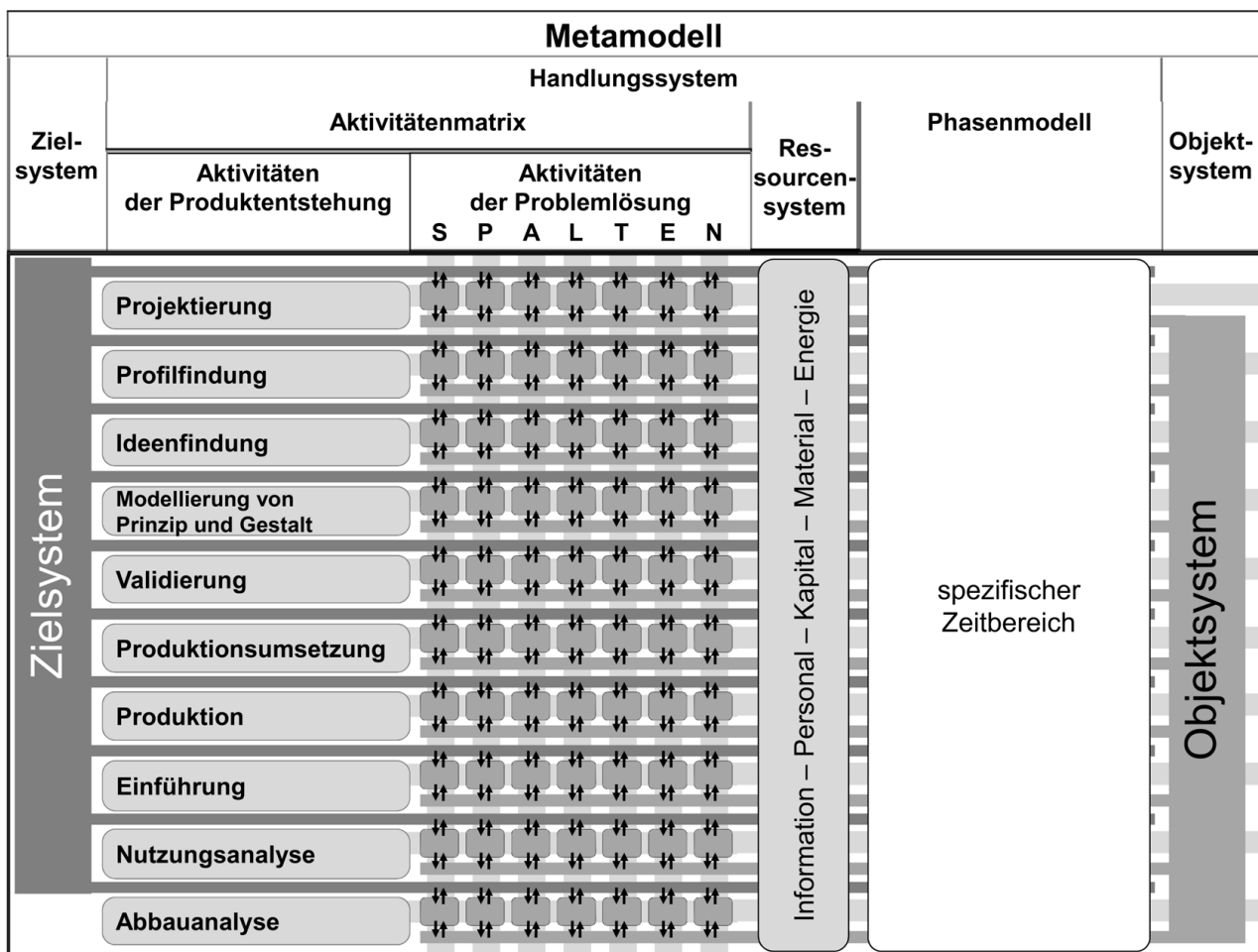
**VDI 2221** Zur Visualisierung und Operationalisierung der beschriebenen prinzipiellen Vorgehensweisen wurden verschiedene Modelle entwickelt. Die klassische Auffassung soll an dieser Stelle durch die VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“<sup>88</sup> repräsentiert werden, vgl. Abbildung 2.11. In dieser Abbildung steht die Synthese klar im Vordergrund, die in der Produktentwicklung benötigte Analyse ist nur implizit in der Möglichkeit zum iterativen Durchlaufen der Phasen angedeutet. Weiterhin ist die Trennung der Entwicklung von Funktion und Gestalt in unterschiedliche Phasen (vgl. Abschnitt 2.6.1) dargestellt.



**Abbildung 2.11** VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte. Abbildung entnommen aus Watty (2006), S. 53 nach VDI 2221 (1993), S. 28

<sup>88</sup>VDI 2221 (1993)

**iPeM** Im Gegensatz dazu spiegelt das „Integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM)“<sup>89</sup>, vgl. Abbildung 2.12, ein aktuell propagiertes Modell wider. Die Auffassung, dass jede Produktentstehung „*einzigartig und individuell*“<sup>90</sup> ist, wird durch die Nutzung von „Aktivitäten“ modelliert. Diese besitzen im Gegensatz zu Phasen zunächst keinen zeitlichen Bezug und können projektspezifisch angeordnet werden. Dieses leistet das im iPeM enthaltene Phasenmodell, das unter Herstellung des Zeitbezugs einen dynamischen Charakter besitzt und verschiedene Projekte individuell abzubilden vermag. Das iPeM ist also ein Metamodell, das die Elemente und Regeln ihrer Verknüpfung für die Prozessmodellierung bereitstellt. Weiterhin ist die Untrennbarkeit der Entwicklung von Funktion und Gestalt durch die Aktivität „Prinzip- und Gestaltmodellierung“ impliziert. Die Analyse ist als eigene Aktivität „Validierung“ modelliert.



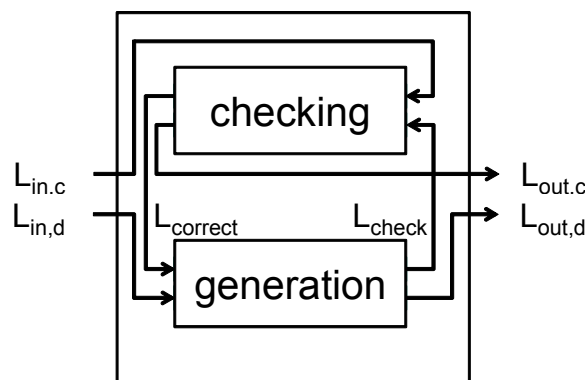
**Abbildung 2.12** Das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM). Abbildung entnommen aus Albers et al. (2010a).

<sup>89</sup>Vgl. Albers / Braun (2011a)  
<sup>90</sup>Vgl. erste Hypothese nach Albers (2010)



## 2.6.2 Mikroelektronik

Kennzeichnend für den Entwurfsprozess elektronischer Systeme ist dessen relativ starke Formalisierung. So wird er über eine sog. Eingabesprache gesteuert, die es ermöglicht, einerseits die Entwurfsabsichten in einer Sub-Sprache „Entwurf“ sowie die zu beachtenden Restriktionen in einer Sub-Sprache „Restriktionen“ zu formulieren. Der Entwurfsprozess überführt den Entwurfsauftrag in spezifische Objekte, die ihrerseits in einer Objektsprache formuliert werden. Um auf dem Weg von Entwurfsauftrag zu Entwurfsobjekt bei Abweichungen Korrekturen vornehmen zu können, werden zusätzlich die Sub-Sprachen „Überprüfung Soll-Ist“ sowie „Korrektur“ benötigt.<sup>91</sup> Damit lässt sich nun ein geschlossener Regelkreis des Entwurfsprozesses elektronischer Systeme aufbauen, vgl. Abbildung 2.13.



**Abbildung 2.13** Makroskopisches Modell des Entwurfsprozesses. Abbildung nachmodelliert in Anlehnung an Rammig (1989), S. 12.

### Abstraktionsebenen

Um den komplexen Entwurfsprozess handhabbar zu machen, wird er auf verschiedenen, rückgekoppelten Abstraktionsebenen durchgeführt. Die Aufteilung und Bezeichnung der Abstraktionsebenen ist zwar nicht normiert, allerdings immer relativ ähnlich und das zugrunde liegende Konzept gleich.<sup>92</sup>

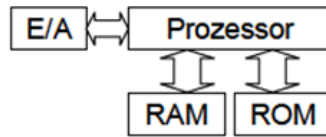
**Systemebene** Auf der Systemebene werden die benötigten Module (Prozessoren, Steuerwerke, etc.) zur Erfüllung der Funktionalität definiert. Geometrieassoziierte/-relevante Informationen dieser Ebene beziehen sich lediglich auf die räumliche Anordnung der Module unter Berücksichtigung externer bauraumbegrenzender Restriktionen.<sup>93</sup> Auf dieser Ebene werden die Kommunikationsstrukturen zwischen den Modulen sowie zur Systemumwelt definiert. In der Systemebene wird außerdem die grundlegende Systemarchitektur definiert.

<sup>91</sup> Vgl. Rammig (1989), S. 11ff.

<sup>92</sup> vgl. Rammig (1989), S. 13ff.

<sup>93</sup> vgl. Rammig (1989), S. 17: „Auf dieser Ebene existiert sehr wenig geometrische Information [...]“

Das Ergebnis des Mikroelektronikentwurfs auf Systemebene ist schematisch in Abbildung 2.14 dargestellt.



**Abbildung 2.14** Schematische Darstellung des Ergebnisses des Mikroelektronikentwurfs auf Systemebene. Abbildung entnommen aus Anon (2012a), S. 40

**Algorithmische Ebene** Die Algorithmen, die auf dieser Ebene definiert werden, dienen zur Interpretation des Instruktionssatzes der auf dieser Ebene betrachteten Prozessoren. Daher wird diese Ebene auch Mikroprogrammierungsebene genannt. Auf dieser Ebene werden logische Verknüpfungen modelliert, geometrische Informationen existieren auf dieser Ebene nicht.<sup>94</sup> Das Ergebnis des Mikroelektronikentwurfs auf der algorithmischen Ebene ist schematisch in Abbildung 2.15 dargestellt.

```

A := A + B + F
IF (C = TRUE) THEN
  A := A + 2 * F
ELSE A := A - 1
ENDIF

```

**Abbildung 2.15** Schematische Darstellung des Ergebnisses des Mikroelektronikentwurfs auf algorithmischer Ebene. Abbildung entnommen aus Anon (2012a), S. 40

**Registertransferebene** Auf der Registertransferebene wird ein elektronisches System sowohl in seinem Verhalten als auch in seiner Struktur beschrieben. Im Gegensatz zur Sichtweise der Algorithmischen Ebene<sup>95</sup> wird hier die (reaktive) Sichtweise der gesteuerten Objekte eingenommen<sup>96,97</sup>. Die Objekte dieser Ebene sind z.B. ALUs (Arithmetisch-logische Einheiten), Busse, Multiplexer, Register, Speicher, etc. Ein wichtiger Entwurfsschritt in der Registertransferebene besteht in der Überführung der ablauforientierten zu einer strukturorientierten Darstellung.<sup>98</sup> „Der Übergang von der Registertransferebene zum Layout ist durch Synthesewerkzeuge weitgehend automatisiert“<sup>99</sup>. Das Ergebnis des Mikroelektronikentwurfs auf der Registertransferebene ist schematisch in Abbildung 2.16 dargestellt.

<sup>94</sup>vgl. Rammig (1989), S. 20

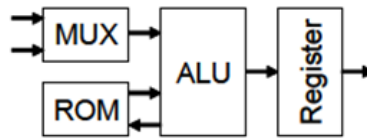
<sup>95</sup>Steuerwerkssicht, d.h. Beschreibung von Programmabläufen (Ausführung verschiedener Aktionen) durch Festlegung von Bedingungen zwischen Aktionen, um die Ausführung weiterer Aktionen in Abhängigkeit von anderen Aktionen oder ihren Ergebnissen zu steuern

<sup>96</sup>Rechenwerkssicht, d.h. die einzelnen Objekte beobachten ihre spezifischen Bedingungen und lösen die ihnen eigene/ zugewiesene Aktion aus

<sup>97</sup>vgl. Rammig (1989), S. 22

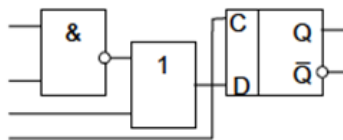
<sup>98</sup>vgl. Evekling (2012)

<sup>99</sup>Evekling (2012)



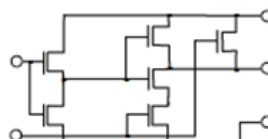
**Abbildung 2.16** Schematische Darstellung des Ergebnisses des Mikroelektronikentwurfs auf Registertransferebene. Abbildung entnommen aus Anon (2012a), S. 40

**Gatter- bzw. Logikebene** Zwar werden in der Registertransferebene auch schon diskrete Objekte (ALUs, Register, etc.) betrachtet, allerdings liegt der Fokus der Betrachtung auf ihrer logischen Verknüpfung durch Definition der zugehörigen Ein- und Ausgangssignale und der sie verknüpfenden Bedingungen. Auf der Gatterebene werden die Objekte der Registertransferebene in entsprechende Netze von Gattern, Flipflops und Einbit-Verbindungsleitungen übersetzt und dadurch weiter konkretisiert.<sup>100</sup> Das Ergebnis des Mikroelektronikentwurfs auf Gatter- bzw. Logikebene ist schematisch in Abbildung 2.17 dargestellt.



**Abbildung 2.17** Schematische Darstellung des Ergebnisses des Mikroelektronikentwurfs auf Gatter- bzw. Logikebene. Abbildung entnommen aus Anon (2012a), S. 40

**Schalter- bzw. Transistorebene** In der Schalterebene werden die Elemente der Gatterebene weiter konkretisiert, indem man sie in Netzwerken aus Schaltern (vereinfachte Transistoren) und Kapazitäten (Knoten) ausdrückt. Während die Strukturbeschreibung (Schematic) die Verknüpfung der einzelnen Schalter und Kapazitäten abbildet, enthält das symbolische Layout (Stickdiagramm) zusätzlich zur Strukturinformation die geometrische Information bezüglich der relativen Lage der Komponenten zueinander sowie der Ebenenzuweisung für die Verbindungsleitungen.<sup>101</sup> Das Ergebnis des Mikroelektronikentwurfs auf Schalter- bzw. Transistorebene ist schematisch in Abbildung 2.18 dargestellt.

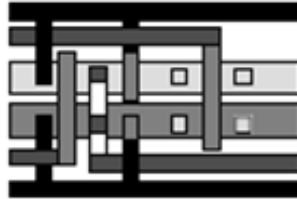


**Abbildung 2.18** Schematische Darstellung des Ergebnisses des Mikroelektronikentwurfs auf Schalter- bzw. Transistorebene. Abbildung entnommen aus Anon (2012a), S. 40

<sup>100</sup>vgl. Rammig (1989), S. 25

<sup>101</sup>vgl. Rammig (1989), S. 27

**Elektrische bzw. geometrisch-topologische Ebene** Auf dieser Ebene wird schließlich das metrische Layout festgelegt. Jedes Bauteil (Transistor, Kapazität, Widerstand) erhält seine räumliche Allokation unter Berücksichtigung seiner realen Abmessungen. Dieses Layout muss alle Restriktionen des Herstellprozesses berücksichtigen. Die für die Systemherstellung benötigten Masken können vom metrischen – also vom dimensions- bzw. abmessungsbehafteten – Layout abgeleitet werden.<sup>102</sup> Das Ergebnis des Mikroelektronikentwurfs auf elektrischer bzw. geometrisch-topologischer Ebene ist schematisch in Abbildung 2.19 dargestellt.



**Abbildung 2.19** Schematische Darstellung des Ergebnisses des Mikroelektronikentwurfs auf elektrischer bzw. geometrisch-topologischer Ebene. Abbildung entnommen aus Anon (2012a), S. 40

Während der Systementwurf auf System-, algorithmischer, Registertransfer- und Gatterebene als funktioneller Entwurf bezeichnet wird, lassen sich die Systementwürfe auf Schalter- und elektrischer Ebene dem physikalischen Entwurf zuordnen.

### Sichten auf die Abstraktionsebenen

Die zuvor genannten Ebenen werden aus verschiedenen Sichten betrachtet, um unterschiedliche Informationen zu erhalten. Das elektronische System wird aus der *Verhaltenssicht* betrachtet, wenn man die Funktionsweise des Systems analysieren will. Es werden, ausgehend von initiiierenden Ereignissen, die zeitliche Abfolge von Aktionen betrachtet, die durch die Systemelemente realisiert werden. In der *Struktursicht* tritt der grundsätzliche Aufbau des Systems in den Vordergrund. Diese Sicht verdeutlicht, wie das System aus seinen Elementen aufgebaut ist und wie diese miteinander in Wechselwirkung stehen. Die *Geometriesicht* beinhaltet Informationen zu den geometrischen Abmessungen der eingesetzten Elemente, zum Verlauf der für ihre Verbindung benötigten Leiterbahnen und zur Realisierungsebene, auf der die Elemente realisiert werden. Diese Sicht wird eingenommen, um Aussagen zur benötigten Chipfläche, zur Schachtelung der Bauteile, zum Routing von Leiterbahnen etc. zu generieren bzw. zu erhalten. Die *Testsicht* als vierte mögliche Sicht auf ein mikroelektronisches System stellt das Verhalten des Systems während der Validierung, Verifikation und Evaluation in den Mittelpunkt. Allerdings gibt es zwischen der Testsicht und der Verhaltenssicht starke Überschneidungen, weshalb diese Sicht nicht immer als separate Sicht aufgeführt wird.

<sup>102</sup>vgl. Rammig (1989), S. 30

## Automatische Schaltungssynthese

*„Neben der mit der Steigerung der Integrationsdichte gekoppelten Weiterentwicklung der Prozeß- und Reinraumtechnik, hat sich auch der Schaltkreisentwurf in nicht geringerem Umfang verändert. Wurden zunächst die Masken noch von Hand gezeichnet (bzw. gerubbelt), so wurden schon bald CAD Software und Plotter eingesetzt, um die Arbeit zu erleichtern und zu beschleunigen. Mit der Zunahme der Integrationsdichte wurde auch die CAD-unterstützte Zeichnungserstellung zu umfangreich und fehlerträchtig. Daher mussten Programme entwickelt werden, die den Designer von den zunehmend komplexeren Aufgaben der Schaltungssynthese entlasten. Mit der Steigerung der Komplexität werden für Standardaufgaben heute weitgehend vollautomatische Layoutwerkzeuge verwendet (Flurplanung, Platzierung, Verdrahtung).“<sup>103</sup>*

## Modellierung mikroelektronischer Produktentwicklungsprozesse

In der Elektronik beschreibt das Y-Diagramm<sup>104</sup>, vgl. Abbildung 2.20, den Hardwareentwurf elektronischer Schaltkreise. Es beinhaltet die drei Sichten (vgl. Abschnitt 2.6.2) auf die im Entwicklungsprozess genutzten Abstraktionsebenen (vgl. Abschnitt 2.6.2). Das Abstraktionsniveau nimmt von außen nach innen ab; die Beschreibung eines Entwicklungsprozesses, an dessen Ende ein konkretes Verhalten auf Basis einer konkreten Struktur, manifestiert in einer konkreten Gestalt steht, verläuft bei Projektion auf das Y-Diagramm somit spiralförmig von außen nach innen.

### 2.6.3 Softwaretechnik

Die Softwaretechnik wird von Balzert beschrieben als *„Zielorientierte Bereitstellung und systematische Verwendung von Prinzipien, Methoden und Werkzeugen für die arbeitsteilige, ingenieurmäßige Entwicklung und Anwendung von umfangreichen Softwaresystemen.“*<sup>105</sup>

Entsprechend der allgemeinen Auffassung können Softwareentwicklungsprozesse unterteilt werden in die Phasen „Spezifikation“, „Entwurf und Implementierung“, „Validierung“ sowie „Weiterentwicklung“<sup>106</sup>.

### Softwarespezifikation

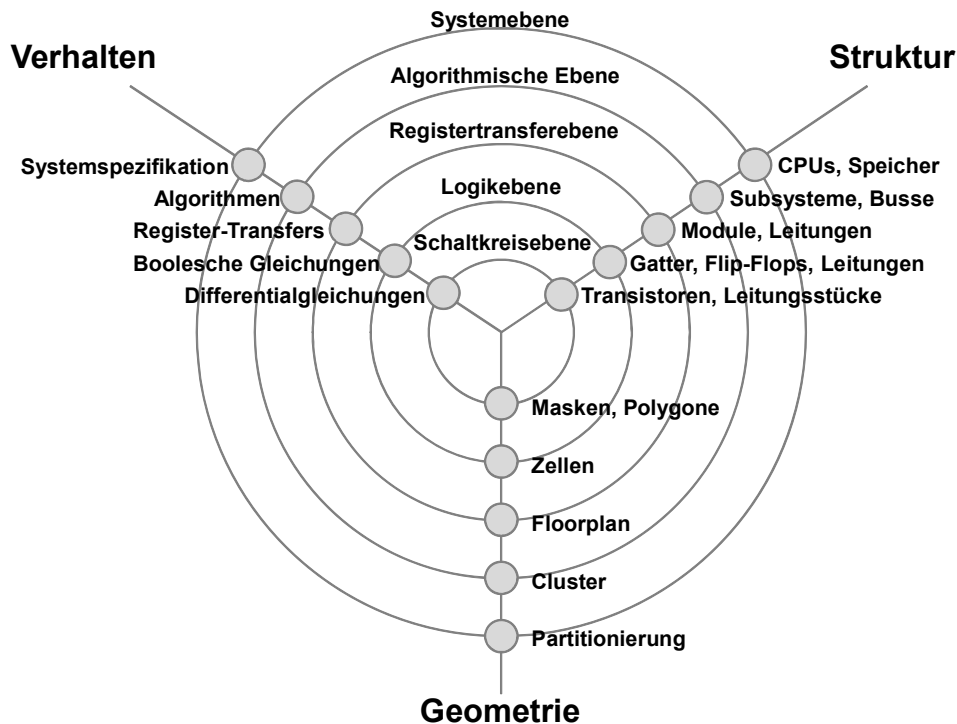
Die Softwarespezifikation dient dazu, die Anforderungen an ein Softwaresystem zu sammeln und Testfälle zu definieren, die die spätere Validierung des entwickelten Systems gegen die

<sup>103</sup>Kasper (2000), S. 3 f.

<sup>104</sup>Vgl. Gajski / Kuhn (1983); vgl. Walker / Thomas (1985); vgl. Dost / Herrman (2001)

<sup>105</sup>Balzert (2001), S.36. „Zielorientierung“ bedeutet hier die Berücksichtigung von Zeit, Kosten und Qualität.

<sup>106</sup>Vgl. Sommerville (2007) S. 119; vgl. ähnlich Sneed et al. (2005), S. 22



**Abbildung 2.20** Y-Diagramm von Gajsky und Kuhn: konzentrische Kreise repräsentieren die Abstraktionsebenen, die Achsen die Sichten darauf. Abbildung nachmodelliert in Anlehnung an Dost / Herrman (2001), S. 377

Anforderungen erlauben.<sup>107</sup>

Die Anforderungen können, wenn sie direkt zu erkennen sind, in einem entsprechenden Fachkonzept festgehalten werden. Da dieses aufgrund „[...] der zunehmenden Komplexität der Anwendungen immer seltener der Fall ist [...]“<sup>108</sup>, wird immer häufiger zuerst ein Prototyp gebaut. Dieser kann dazu genutzt werden, die spätere Anwendungssituation abzubilden und daraus die Anforderungen abzuleiten. In den Anforderungen wird festgehalten, welche Geschäftsprozesse durch die Software unterstützt (*Prozessmodell*) und welche Geschäftsobjekte (*Objektmodell*) abgebildet werden sollen. Zur Definition der Interaktionen von Geschäftsprozessen und Geschäftsobjekten wird ein *Schnittstellenmodell* erarbeitet, die Spezifikation der zu erzeugenden Daten und ihrer Formate und die Spezifikation der Datenablage werden in einem *Datenmodell* festgehalten. Das *Funktionsmodell* beschreibt die Anwendungsfälle, in denen die Software zum Einsatz kommt, das *Entscheidungsmodell* dient zur Beschreibung der Geschäftsregeln.<sup>109</sup> Zusätzlich zu diesen Anforderungen werden weitere nicht-funktionale Anforderungen (Qualitätskriterien, Risikoabschätzungen,...) ermittelt.

<sup>107</sup>Vgl. Sommerville (2007), S. 34

<sup>108</sup>Sneed et al. (2005), S. 23

<sup>109</sup>Vgl. Sneed et al. (2005), S. 23

## Softwareentwurf und -implementierung

In der auf die Spezifikation folgenden Aktivität Systementwurf und -implementierung wird die Software „gebaut“. Diese Aktivität wird typischerweise weiter untergliedert in das Design (also den Softwareentwurf) und die Programmierung (also die Softwareimplementierung).<sup>110</sup>

In der *Designaktivität* wird die logische Organisation der Software entwickelt. Dazu wird die Systemarchitektur entwickelt, die zu nutzende Programmiersprache definiert, die Konkretisierung der Schnittstellen zwischen den einzelnen Programmteilen durchgeführt und die Echtzeitsoftware und die Bedienoberflächen entworfen.<sup>111</sup>

Die *Programmierung* des Quellcodes erfolgt auf Basis der zuvor definierten Schnittstellen in Modulen bzw. Systemkomponenten, die keinerlei fertigungstechnischen Restriktionen (im Gegensatz zu hardware-basierten Produkten) unterliegen.<sup>112</sup> Ziel der Programmierung ist es, die in der Systemspezifikation „[...] geforderten Leistungen in Form eines oder mehrerer Programme zu realisieren.“<sup>113</sup> Die Ergebnisse der Programmierung führen zu den Teilprodukten wie dem Quellprogramm, dem Objektprogramm sowie der Testplanung und dem Testprotokoll für das jeweils programmierte Teilsystem.<sup>114</sup>

## Softwarevalidierung

Nachdem die Funktionalität der Module bzw. Teilsysteme separat getestet wurde, werden diese zum Gesamtsystem zusammengesetzt. Daraufhin müssen die Teilsysteme im Systemzusammenhang sowie das Gesamtsystem selbst getestet werden. Die Optimierung des Endprodukts muss schließlich auf Systemebene durchgeführt werden. Die Softwaretechnik unterscheidet Verifikation und Validierung. In der Verifikation wird geprüft, ob das entwickelte System die vielfältigen Anforderungen der Softwarespezifikation erfüllt<sup>115</sup>, während in der Validierung überprüft wird, ob das entwickelte System die Kundenerwartungen erfüllt<sup>116</sup>. Da die Softwarespezifikation ein *Modell* der Kundenerwartungen ist, führt sie notgedrungen zu einem Informationsverlust<sup>117</sup> und erfordert damit die Validierung.

---

<sup>110</sup>Vgl. Sneed et al. (2005), S. 24

<sup>111</sup>Vgl. Balzert (2001), S. 696; vgl. Sommerville (2007), S. 273 ff.; vgl. Sneed et al. (2005), S. 24

<sup>112</sup>Vgl. Watty (2006), S. 72

<sup>113</sup>Balzert (2001), S. 1064

<sup>114</sup>Vgl. Balzert (2001), S. 1065

<sup>115</sup>„Verifikation: Erstellen wir das Produkt richtig?“ Sommerville (2007), S. 556

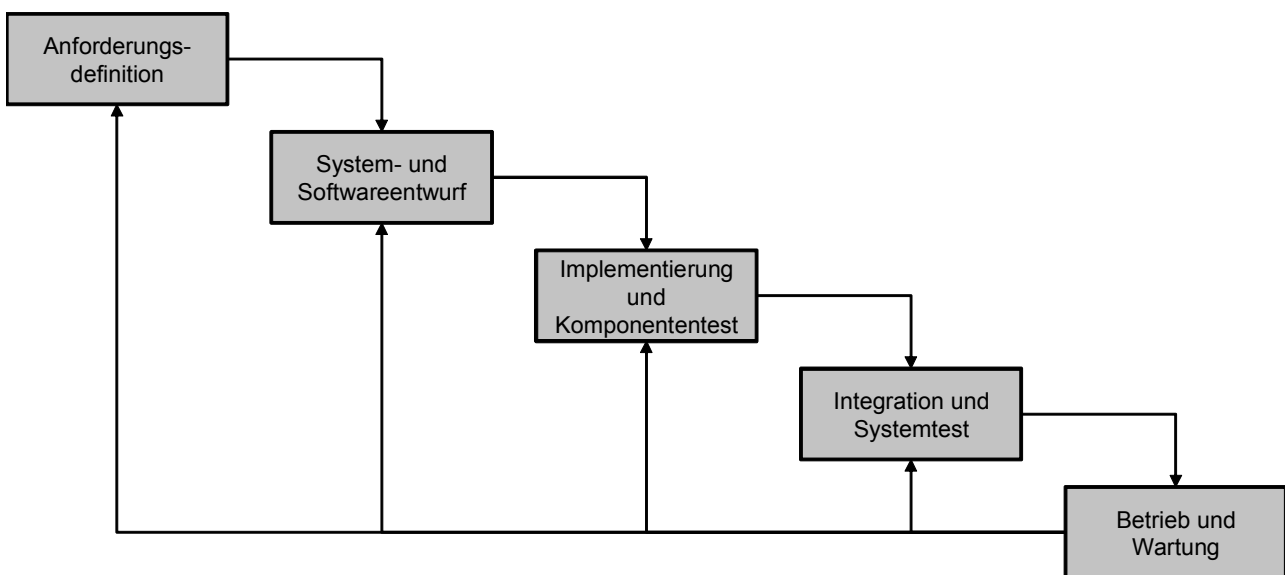
<sup>116</sup>„Validierung: Erstellen wir das richtige Produkt?“ Sommerville (2007), S. 556

<sup>117</sup>Dieser Informationsverlust resultiert aus dem Verkürzungsmerkmal von Modellen, welches neben dem Abbildungsmerkmal und dem pragmatischen Merkmal ein typisches, allgemeines Merkmal der Modellbildung ist. „Modelle erfassen im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen“, Stachowiak (1973), S. 131 f. zitiert nach Meboldt (2008), S. 102

## Modellierung softwaretechnischer Produktentwicklungsprozesse

Zur Modellierung softwaretechnischer Produktentwicklungsprozesse wurden verschiedene Modelle entwickelt, von denen hier stellvertretend das „Wasserfallmodell der Informatik“, das „Spiralmodell der Softwareentwicklung“ und das „V-Modell der Informatik“ vorgestellt werden sollen.

**Wasserfallmodell der Informatik** Werden die oben genannten typischen Aktivitäten der Softwaretechnik (Spezifikation, Entwurf und Implementierung, Validierung) chronologisch hinter- und untereinander angeordnet, ergibt sich das klassische Wasserfallmodell<sup>118</sup>, vgl. Abbildung 2.21.



**Abbildung 2.21** Wasserfallmodell der Informatik. Eigene Darstellung in Anlehnung an Sommerville (2007), S. 97.

Die dem Wasserfallmodell zugrunde liegende Überlegung besteht darin, dass „aus jeder Phase ein oder mehrere Dokumente hervorgehen, die abgenommen, 'reviewed' werden. Die nächste Phase sollte nicht beginnen, bevor nicht die vorherige abgeschlossen wurde.“<sup>119</sup>. Da diese Auffassung nicht die Realität der Softwareentwicklung widerspiegelt (es gibt Iterationen aufgrund von Fehlern, da Anforderungen erneut geklärt werden müssen, etc.), wurden weitere Modelle entwickelt, die Iterationen flexibler berücksichtigen können.

**Spiralmodell** Das Spiralmodell<sup>120</sup> (vgl. Abbildung 2.22) stellt eine Möglichkeit dar, Iterationen im Softwareentwicklungsprozess zu berücksichtigen. Projiziert auf das Spiralmodell bewegt sich die Produktentwicklung von innen nach außen und damit vom ersten Grobentwurf

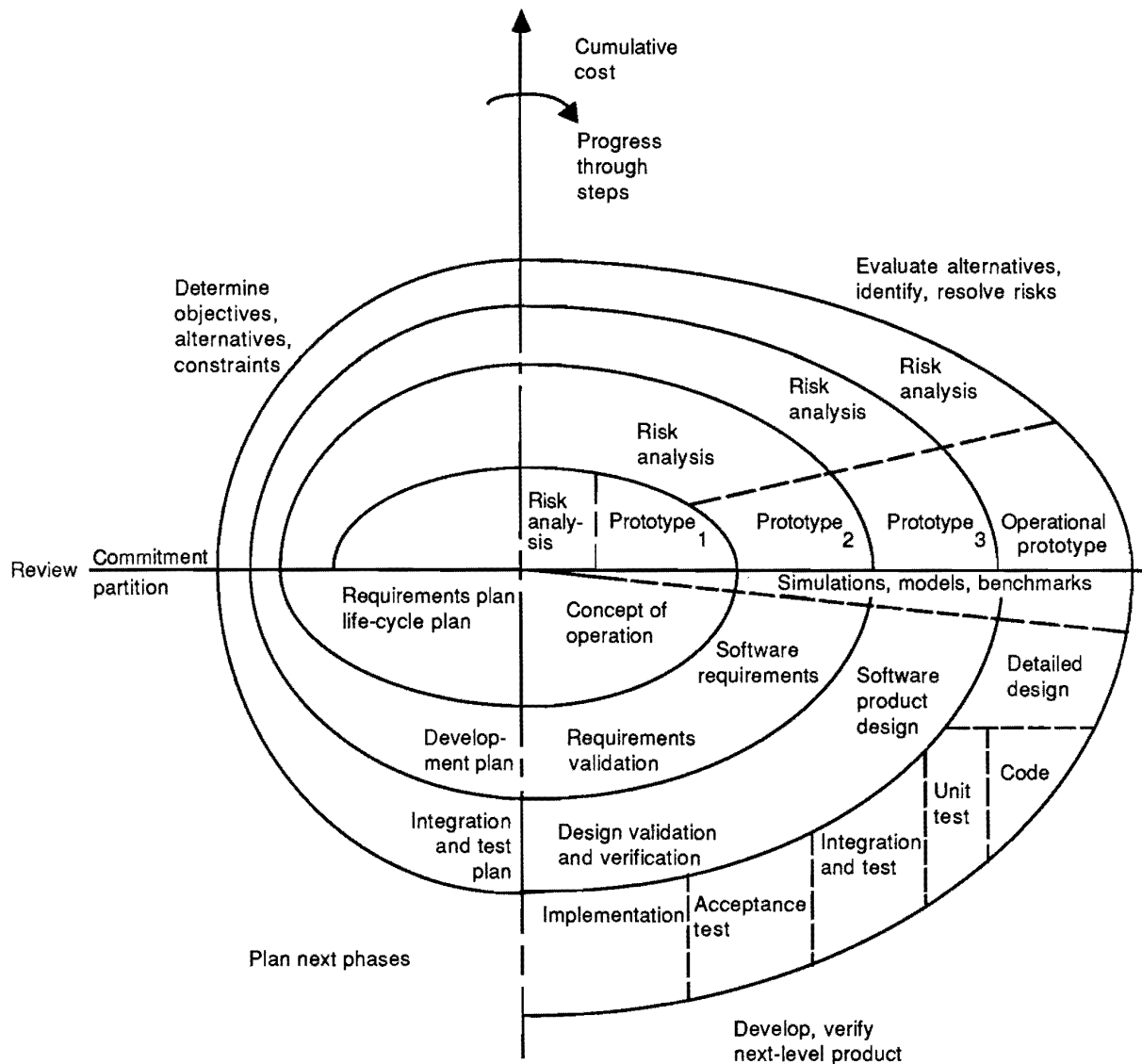
<sup>118</sup>Vgl. Royce (1970)

<sup>119</sup>Sommerville (2007), S. 97

<sup>120</sup>Vgl. Boehm (1988), S. 61 ff.



zum fertig detaillierten System.<sup>121</sup> Dabei werden Systemspezifikation, Softwareentwurf und -implementierung gleichzeitig entwickelt. „Jede Windung der Spirale ist in vier Segmente aufgeteilt: Ziele aufstellen [...], Risiken einschätzen und verringern [...], Entwicklung und Validierung [...], Planung [des weiteren Vorgehens].“<sup>122</sup> Jede Windung kann dabei als eine Phase des Produktentwicklungsprozesses aufgefasst werden.<sup>123</sup>



**Abbildung 2.22** Spiralmodell der Softwaretechnik: jede Windung der Spirale kann als eine Phase im Produktentwicklungsprozess betrachtet werden. Abbildung entnommen aus Boehm (1988).

**V-Modell der Informatik** Das in Abschnitt 2.6.4 beschriebene V-Modell der Mechatronik wurde ursprünglich abgeleitet aus dem V-Modell der Softwareentwicklung. Ein erster Ansatz

<sup>121</sup> Vgl. Sommerville (2007), S. 101

<sup>122</sup> Sommerville (2007), S. 103

<sup>123</sup> Vgl. Henrich (2002), S. 51

zur exakten Gegenüberstellung von Entwurfs- und Testfällen findet sich bereits bei LEHMANN<sup>124</sup>. Ausgehend von dieser Darstellung wurden die Modellelemente umsortiert, so dass am linken absteigenden Ast die Entwurfssfälle angeordnet wurden und am aufsteigenden rechten Ast die zugehörigen Testfälle. Das zugrunde liegende Konzept ist bei den verschiedenen Versionen des V-Modells das gleiche: während beim Durchlaufen des V-Modells zunächst das System und seine Elemente immer weiter detailliert werden (absteigender Ast des V), müssen diese im Anschluss daran zum Gesamtsystem integriert und durch entsprechende Testfälle validiert werden.<sup>125</sup>

## 2.6.4 Mechatronik

Der Begriff „Mechatronik“ ist ein Kofferwort aus den Begriffen „**Mechanik**“ und „**Elektronik**“<sup>126</sup> und soll den Trend der zunehmenden Interdisziplinarität heutiger Produktentstehungsprozesse versinnbildlichen. Inzwischen wird oft zusätzlich eine weitere Disziplin – die „Informationstechnik“ – als Teil der Mechatronik angesehen. Gleichzeitig wird es zunehmend schwieriger, Mechatronik vom klassischen Maschinenbau abzugrenzen, da heutige maschinenbauliche Produkte immer stärker elektrische und elektronische Komponenten integrieren und mittels Informationstechnik betrieben und überwacht werden. Die methodische Entwicklung mechatronischer Systeme lässt sich nach dem „Klären der Aufgabenstellung“ in vier wesentliche Aktivitäten untergliedern.

### Systementwurf

Der Systementwurf dient zur Festlegung eines „[...] domänenübergreifenden Lösungskonzepts, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts beschreibt.“<sup>127</sup> Dieses wird vor allem durch die Erstellung einer Funktionsstruktur erzielt, vgl. Abschnitt 2.6.1.

### Domänenspezifischer Entwurf

Der domänenspezifische Entwurf wird, wie der Begriff schon andeutet, innerhalb der einzelnen Disziplinen durchgeführt. Diese Entwurfsprozesse entsprechen wieder den oben beschriebenen disziplinspezifischen Vorgehensweisen.<sup>128</sup> Damit einhergehende Probleme führen aktuell dazu, dass die hier beschriebene Vorgehensweise in Frage gestellt wird und alternative Ansätze entwickelt und propagiert werden, vgl. den nachfolgenden Abschnitt 2.6.4.

<sup>124</sup>Lehman (1980)

<sup>125</sup>Vgl. Versteegen (2000)

<sup>126</sup>Vgl. Bibliographisches Institut GmbH (2012)

<sup>127</sup>VDI 2206 (2004), S. 32 ff.

<sup>128</sup>Vgl. VDI 2206 (2004), S. 35

## Systemintegration

Nachdem die im Systementwurf definierten Teilfunktionen auf die einzelnen Disziplinen aufgeteilt und dort entwickelt wurden, werden sie in dieser Aktivität wieder zusammengeführt.<sup>129</sup>

## Eigenschaftsabsicherung

Die Eigenschaftsabsicherung nimmt in der mechatronischen Produktentwicklung eine herausragende Stellung ein. Einerseits müssen die disziplinspezifisch entwickelten Teilfunktionen jeweils für sich kontinuierlich validiert werden, vgl. Abschnitt 2.6.1. Andererseits müssen insbesondere die Interaktionen der disziplinspezifisch gestalteten Teillösungen nach ihrer Zusammenführung durch die Systemintegration im Gesamtsystemzusammenhang validiert werden. Dieses wird in der Eigenschaftsabsicherung geleistet.<sup>130</sup>

ALBERS widerspricht dieser Grundauffassung zur Entwicklung und Eigenschaftsabsicherung mechatronischer Systeme aufgrund vielfältiger Erfahrungen, die am IPEK – Institut für Produktentwicklung bei der Entwicklung mechatronischer Systeme (z.B. Fahrzeugantriebssystemtechnik, Robotik) und der Entwicklung zugehöriger mechatronischer Prüfstände gesammelt wurden. Jeder Systementwurf (insbesondere auch der mechatronische) muss ebenso wie die Systemvalidierung auf jeder Konkretisierungsstufe immer im Kontext des Gesamtsystems und der das System beeinflussenden Systemumwelt (Bediener, angrenzende Systeme, etc.) betrachtet und durchgeführt werden.

## Modellierung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse

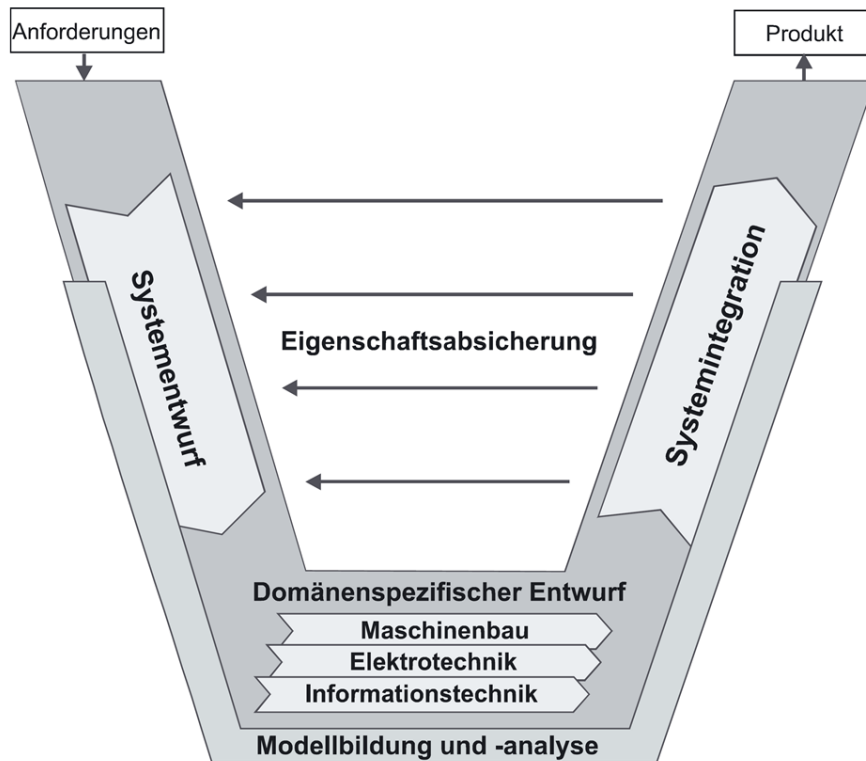
Das V-Modell<sup>131</sup>, vgl. Abbildung 2.23, beschreibt typische Vorgehensweisen zur Entwicklung mechatronischer Produkte und strukturiert sie ausgehend von der Produktspezifikation über die disziplinspezifische Entwicklung (Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik) bis zur Systemintegration und Validierung. Die Produktentwicklung beginnt oberhalb des linken Astes mit der Klärung der Aufgabe und der Erarbeitung der Anforderungen. Danach werden die Aktivitäten „Systementwurf“ (linker Ast), „domänenspezifische Entwicklung“ (Basis) und „Systemintegration“ (rechter Ast) dem „V“ folgend durchlaufen. Die Validierung erfolgt durch den Abgleich erstellter domänen-/disziplinübergreifender (Teil-) Systeme mit dem Systementwurf. Am Ende dieses Prozesses steht das entwickelte Produkt.

Aufgrund der oben diskutierten Aspekte, dass Systementwurf und -validierung immer nur im Kontext zum Gesamtsystem durchgeführt werden können, verfolgt ALBERS einen alternativen Ansatz zur Modellierung mechatronischer Entwicklungsprozesse. Dieser basiert auf dem X-in-the-Loop-Framework (XiL), das als ganzheitlicher Ansatz die Aktivität „Validierung“ im

<sup>129</sup>Vgl. VDI 2206 (2004), S. 35 ff.

<sup>130</sup>Vgl. VDI 2206 (2004), S. 38 ff.

<sup>131</sup>Vgl. VDI 2206 (2004)



**Abbildung 2.23** V-Modell der Mechatronik. Abbildung entnommen aus VDI 2206 (2004), S. 29

Entwicklungsprozess methodisch unterstützt. In der Validierung findet der Abgleich des erreichten Standes der Objekte des Entwicklungsprozesses – zum Beispiel eine Konzeptstudie (frühe Phase) oder ein virtueller oder realer Prototyp – mit den im Zielsystem definierten Anforderungen statt. Die Unit under Test (UUT) ist dabei der Teil des Gesamtsystems, der im Designraum des Entwicklers liegt, den er also aktiv beeinflussen kann. Der Rest wird – mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad – dazu „gekoppelt“. Das kann wiederum sowohl durch Simulationsmodelle als auch durch Prüfstände erfolgen. Vorteil dieser Vorgehensweise ist es, dass auch bei der Entwicklung von Teilsystemen die Wechselwirkungen mit dem Gesamtsystem transparent bleiben und konsequent berücksichtigt werden.<sup>132</sup>

## 2.6.5 Mikrosystemtechnik

### Ähnlichkeit zur Mechatronik

An den Konstrukteur von Mikrosystemen werden besondere Anforderungen gestellt. Ähnlich wie in der Mechatronik muss der Konstrukteur in der Systemsynthese auch hier mechanische, elektronische und informationsverarbeitende Teilfunktionen technisch realisieren und kombinieren und in der Systemanalyse in der Lage sein, disziplinübergreifende Funktions-Gestaltzusammenhänge zu verstehen. In makroskopisch mechatronischen Systemen werden

<sup>132</sup>Vgl. Albers et al. (2009); vgl. Geier et al. (2009); vgl. Albers et al. (2010b)

mechanische, elektronische und informatorische Teilfunktionen nach Klärung der Schnittstellen insbesondere disziplinspezifisch entwickelt und anschließend in der Systemintegration miteinander gekoppelt, vgl. Abschnitt 2.6.4. Dabei definieren die Schnittstellen zwischen den disziplinspezifischen Teilfunktionen oftmals gleichzeitig die Module des Systems. Diese lassen sich dann wiederum mit den jeweiligen disziplinspezifischen Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeugen entwickeln.<sup>133</sup>

### Unterschied zur Mechatronik

In der Mikrosystemtechnik hingegen werden mechanische, elektronische und informationsverarbeitende Teilfunktionen in viel stärkerem Maße ineinander integriert, um einerseits möglichst viel Bauraum einzusparen<sup>134</sup> und andererseits mikrospezifische Funktionsweisen überhaupt erst zu ermöglichen<sup>135</sup>. Außerdem müssen zur Optimierung des Gesamtsystems seine (disziplinübergreifenden) Funktionen optimiert werden, es reicht nicht aus, lediglich die einzelnen disziplinspezifischen Module zu optimieren und zusammenzufügen. Der Konstrukteur in der Mikrosystemtechnik muss die klassischen Disziplinen also noch viel stärker miteinander vereinen, um zu neuen und Erfolg versprechenden technischen Lösungen zu gelangen.

Je nach gewählter, zu nutzender Produktionstechnologie unterscheiden sich die Produktentstehungsprozesse in der Mikrosystemtechnik erheblich. Allen gemein ist aber der starke produktionstechnologische Einfluss, der dazu führt, dass Mikrosysteme zwar primär „top down“, gleichzeitig aber gleichberechtigt „bottom-up“ entwickelt werden müssen. Das bedeutet, dass *„[...] im Top-Down-Entwurfstil an der Funktion gemessene konzeptionelle Entscheidungen auf Systemebene getroffen [werden, während] gleichzeitig bottom-up technologiebedingte Detailentwürfe von Strukturdetails statt[finden].“*<sup>136</sup> Diese kombinierte Vorgehensweise wird als „Meet in the Middle-Strategie“ bezeichnet.<sup>137</sup>

Der starke Einfluss der genutzten Produktionstechnologie auf die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik spiegelt sich auch in den genutzten Modellen zur Beschreibung dieser Prozesse.<sup>138</sup>

---

<sup>133</sup>Vgl. Abschnitt 2.6.4

<sup>134</sup>Die wesentliche Stärke von Mikrosystemen liegt eben, wie es der Name schon sagt, in ihren möglichst geringen Abmessungen. Dadurch werden sie nutzbar in übergeordneten Systemen.

<sup>135</sup>Ein Beispiel hierfür sind Dehnmessstreifen, deren Struktur mechanisch verformt wird, um hierdurch eine elektrische Widerstandsänderung zu erzeugen, die gemessen wird. Der Konstrukteur dieser Funktion musste also sowohl mechanische als auch elektronische Sichtweisen einnehmen, eine disziplinspezifische Sichtweise hätte hier nicht diese Lösung entstehen lassen.

<sup>136</sup>Marz (2005), S. 93

<sup>137</sup>Vgl. Müller-Glaser (1997)

<sup>138</sup>Vgl. hierzu Popp et al. (2004): *„The influence of the fabrication aspects cannot be reduced to design rules [...]. The overall design flow is now dominated by the fabrication, and the shapes of the components no longer play a minor role.“*

## Modellierung mikrotechnischer Produktentwicklungsprozesse

**Brezelmodell** Das Brezel-Modell<sup>139</sup> beschreibt typische Vorgehensweisen in Produktentwicklungsprozessen siliziumbasierter Mikrosysteme und ist in der Lage, siliziumtechnologie-spezifische Abfolgen einzelner Entwicklungsaktivitäten abzubilden. Ein Entwicklungsprozess<sup>140</sup> startet bei der Definition der Anforderungen. Daraufhin kann der Entwickler die Produktstruktur beschreiben – vgl. Schritt (a) in Abbildung 2.24 LINKS – und von dieser ein 3D-Modell ableiten (b). Hiervon kann eine passende Fertigungsprozessabfolge abgeleitet (c) und simuliert (d) werden. Die Simulation des Fertigungsprozesses (Grundsubstrat–Belichtung unter Maske–Ätzen–Schicht aufbauen–belichten–ätzen– etc.) sollte ein dem ursprünglich erstellen 3D-Modell deckungsgleiches, weiteres 3D-Modell ergeben, wenn in der Wahl der Fertigungsprozessequenz keine Fehler gemacht wurden. Die Schritte (c) und (d) werden typischerweise iterativ durchlaufen und schließlich wird das Mikrosystem produziert.

Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit getroffene Aussage, die Vorgehensweisen zur Entwicklung mikrotechnischer Systeme seien stark beeinflusst durch die gewählte Produktionstechnologie und daher stark unterschiedlich und nicht etabliert<sup>141</sup>, lässt sich sogar innerhalb *einer* Technologie (Silizium) auf Basis *eines* Modells (Brezelmodell) dokumentieren. So beschreiben Popp et al. (2004) und Ortloff (2006) – ehemalige Mitarbeiter von Prof. Brück im Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Universität Siegen – das Vorgehen zur Entwicklung eines „komplett neuen Produktes“ anhand des Brezelmodells auf genau entgegengesetzte Weise. Während Ortloff einen solchen Entwicklungsprozess am linken Ast beginnend beschreibt<sup>142</sup>, beschreiben Popp et. al. diesen am rechten Ast beginnend<sup>143</sup>, vgl. Abbildung 2.24.

**Sichelmodell** Das Sichelmodell<sup>144</sup> beschreibt typische Vorgehensweisen in Produktentwicklungsprozessen der werkzeuggebundenen Mikrosystemtechnik und stellt deren Eigenschaft in den Fokus, die Systementwicklung von Anfang an parallel auf System- und Komponentenebene auch auf struktureller Ebene durchzuführen. Diese Ebenen werden als drei konzentrische Ringe modelliert, wobei das Abstraktionsniveau von außen nach innen abnimmt. Das parallele Durchlaufen von Struktur-, Komponenten- und Systemebene im Gegenuhrzeigersinn repräsentiert den Bottom-Up-Entwurf, dem der tangentielle Top-Down-Entwurf überlagert

<sup>139</sup>Vgl. Wagener et al. (2002); vgl. Wagener / Hahn (2003); vgl. Popp et al. (2004)

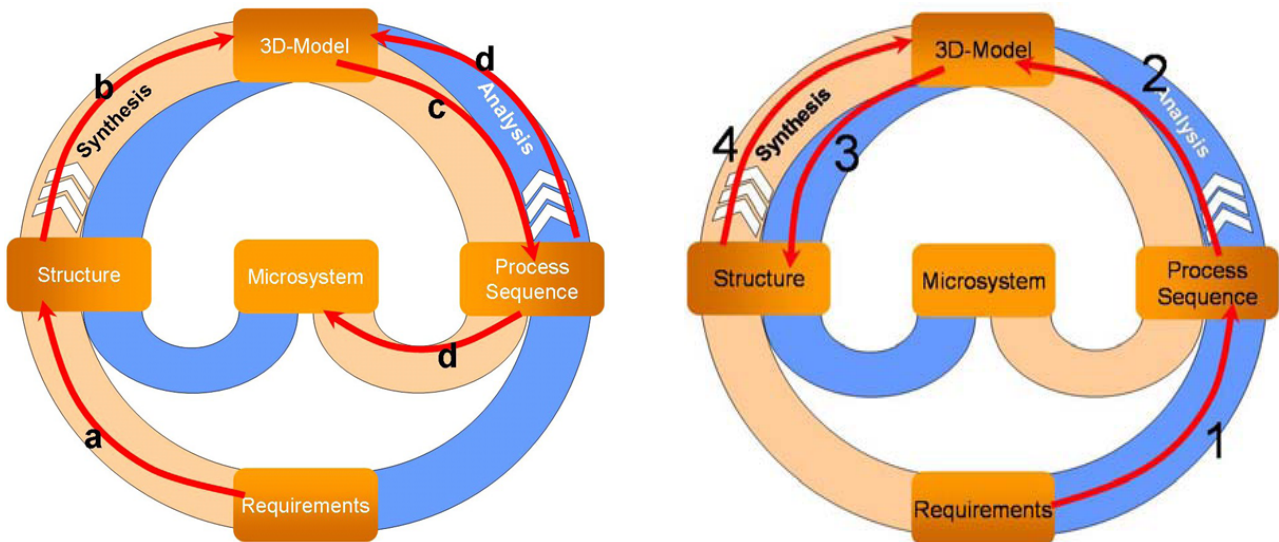
<sup>140</sup>Die Beschreibung basiert auf den Ausführungen in Ortloff (2006), S. 190

<sup>141</sup>Vgl. Abschnitt 4.2

<sup>142</sup>„A possible design flow for a complete new device with unknown process flow could be as laid out in figure 7.2. The model illustrates the possible flow: The designer starts with creating a structural description based on the requirements (step a) [...]“; Ortloff (2006), S. 190

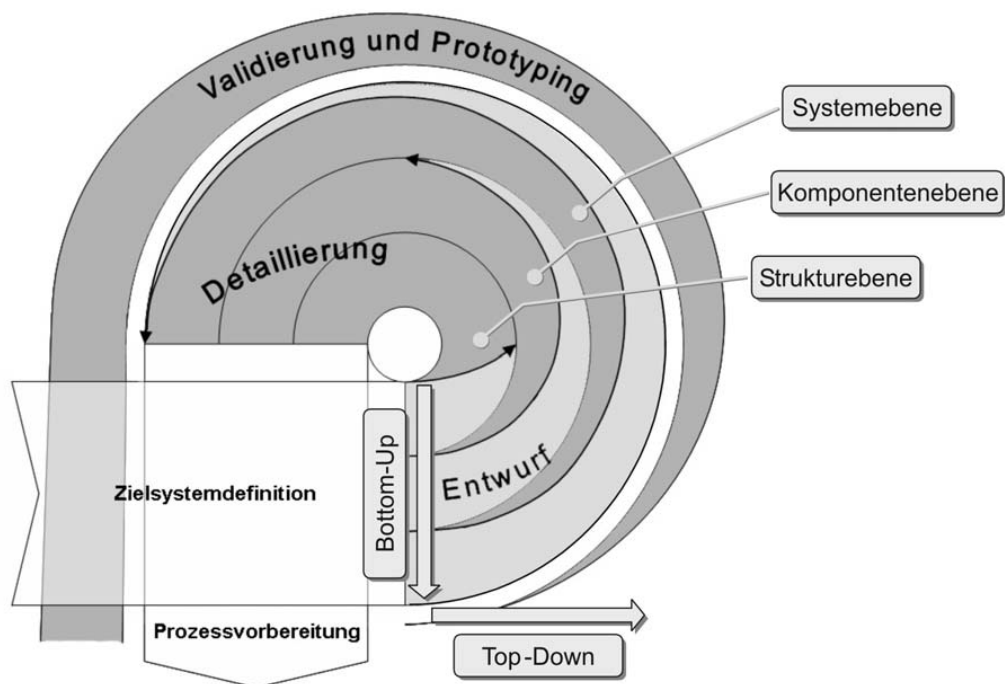
<sup>143</sup>„A possible design flow for a completely new device with unknown process flow could be as laid out in Figure 3. [...] The designer starts with the right (physical) branch of the Pretzel and designs the system as usual by creating a process flow (step 1) [...]“; Popp et al. (2004)

<sup>144</sup>Vgl. Marz (2005), S. 94; vgl. Albers et al. (2007)



**Abbildung 2.24** LINKS: Ein Mikro-PEP abgebildet im Brezelmodell nach Ortloff. Abbildung entnommen aus Ortloff (2006), S. 190. RECHTS: Der gleiche Mikro-PEP abgebildet im Brezelmodell nach Popp. Abbildung entnommen aus Popp et al. (2004).

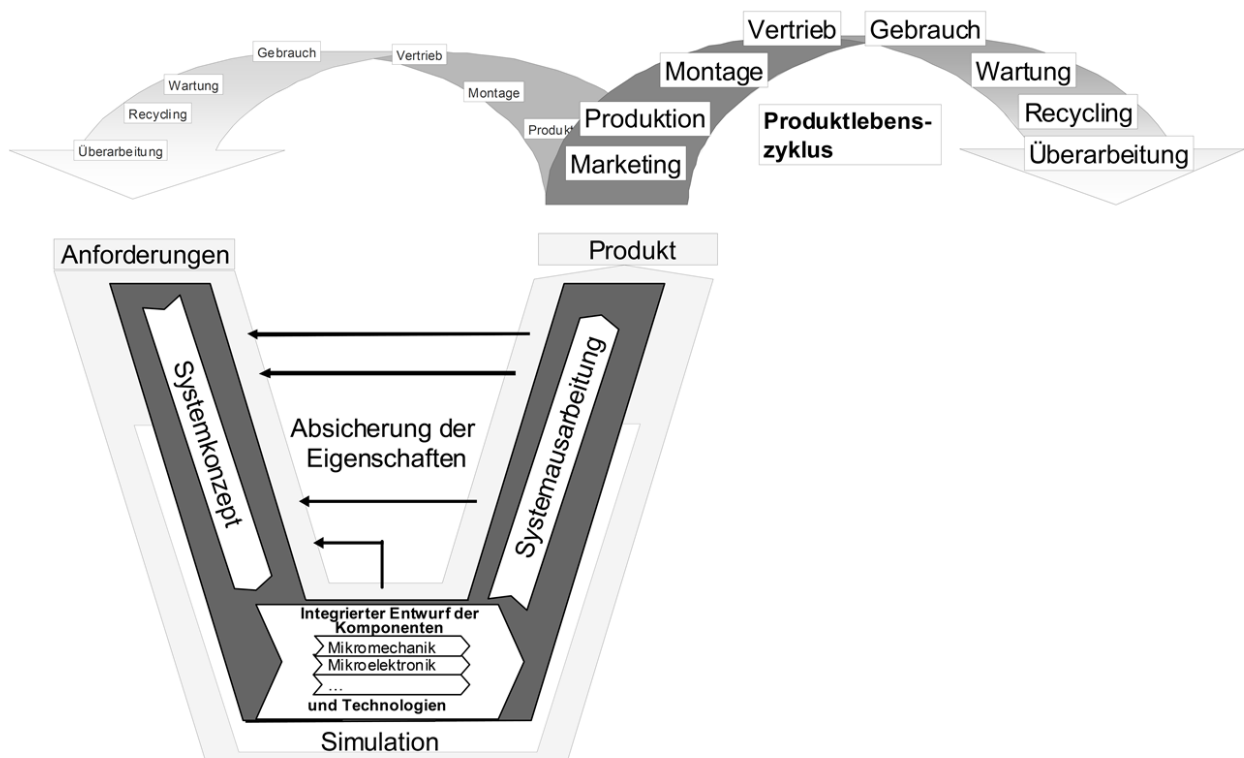
ist.<sup>145</sup> Damit ist das Sichelmodell also in der Lage, die zuvor beschriebene „Meet in the middle-Strategie“ abzubilden.



**Abbildung 2.25** Sichelmodell der Produktentwicklung für die urformende Mikrotechnik. Abbildung entnommen aus Marz (2005), S. 94.

<sup>145</sup>Vgl. Marz (2005), S. 95

**V-Modell der Mikrosystemtechnik** Die Mikrosystemtechnik besitzt zwar spezifische Vorgehensweisen bei der Produktentwicklung (z.B. „Meet in the middle-Strategie“), vereint dabei aber ähnlich wie die Mechatronik verschiedene Disziplinen. Daher ist es nachvollziehbar, für die Modellierung mikrotechnischer Produktentwicklungsprozesse das V-Modell der Mechatronik zu adaptieren. Das V-Modell der Mikrosystemtechnik<sup>146</sup> basiert auf dieser Überlegung. Die wesentlichen Unterschiede sind der „integrierte Entwurf der Komponenten“ (vgl. Abbildung 2.26), der den domänenspezifischen Entwurf wie im klassischen V-Modell genutzt, ersetzt, dessen Validierung am zuvor entwickelten Systemkonzept sowie Einbindung des Modells in vorhergehenden, aktuellen und nachfolgenden Produktlebenszyklus.



**Abbildung 2.26** V-Modell der Mikrosystemtechnik nach Watty. Abbildung entnommen aus Watty (2006), S. 90.

**Weitere Modelle** Weitere Modelle zur Beschreibung mikrosystemtechnischer Produktentwicklungsprozesse sind z.B. das Q-Modell<sup>147</sup>, das hierarchische Vorgehen beim Entwurf von Mikrosystemen nach Müller-Glaser<sup>148</sup>, die Modellierung des MEMS design flow nach Fedder<sup>149</sup>, das deskriptive Modell von Sahoo et. al.<sup>150</sup>, etc. Diese Ansätze zur Modellierung von Produktentwicklungsprozessen in der Mikrosystemtechnik unterscheiden sich wie auch

<sup>146</sup>Vgl. Watty (2006)

<sup>147</sup>Vgl. Tritsch / Büttgenbach (2008)

<sup>148</sup>Vgl. Müller-Glaser (1997)

<sup>149</sup>Vgl. Fedder (1999)

<sup>150</sup>Vgl. Sahoo et al. (2009)



schon die zuvor beschriebenen Modelle in der ein oder anderen – zum Teil gravierenden – Art und Weise voneinander. In Bezug auf ihr Abstraktionsniveau sind diese Modelle den Vorgenannten jedoch ähnlich. Auf eine weitere Beschreibung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

## 2.7 PEP-Modell Mikrounformen

In Kapitel 2.6 wurde ein Überblick gegeben über verschiedene Modelle zur Beschreibung von disziplinspezifischen sowie disziplinübergreifenden Produktentwicklungsprozessen. Auffällig ist, dass es zur Beschreibung von Produktentwicklungsprozessen in der Mikrosystemtechnik viele unterschiedliche Modelle gibt. Im Unterschied zu den klassischen Modellen des Maschinenbaus, die im Wesentlichen miteinander konkurrieren oder Weiterentwicklungen eines Vorgängermodells darstellen, existieren PEP-Modelle in der Mikrosystemtechnik oft parallel zueinander, ohne miteinander zu konkurrieren. Dieses lässt sich durch die *Technologiefokussiertheit* der Mikro-PEP-Modelle erklären. Während im herkömmlichen Maschinenbau die allgemeine Vorgehensweise und der Charakter eines Produktentwicklungsprozesses komplexer Systeme nur sekundär von den zur Realisierung eines Produktes genutzten Fertigungsverfahren abhängt, beeinflusst die Wahl der Fertigungstechnologie in der Mikrosystemtechnik ganz entscheidend den Produktentstehungsprozess und die Gestalt des Produktes. So unterscheidet sich ein Modell zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen auf Basis der Silizium-Mikromechanik<sup>151</sup> daher grundlegend von einem Modell zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen auf Basis der urformenden Mikrosystemtechnik. Beide Modelle sind daher gleichzeitig gültig und konkurrieren nicht miteinander.

Eine weitere Eigenschaft dieser Modelle ist ihr relativ hohes Abstraktionsniveau. Dadurch sind sie zwar in der Lage, Verständnis zu erzeugen für die grundsätzlichen und allgemeinen Vorgehensweisen zur Entwicklung mikrotechnischer Systeme in Abhängigkeit der zu nutzenden Fertigungstechnologie. Gleichzeitig unterstützen sie aber weder den Manager bei der Planung, Koordination und Überwachung, noch den Konstrukteur bei der konkreten Implementierung und Durchführung eines Produktentstehungsprozesses. Hierzu werden z.B. Angaben über benötigte Einzelaktivitäten, deren zeitlicher Dauer und relativer Abfolge, für die erfolgreiche Aktivitätsdurchführung zur Verfügung stehende Methoden und Tools, etc. benötigt.

In der letzten Förderphase des SFB 499<sup>152</sup> bestand die Herausforderung darin, die *Interaktionen* der am PEP Beteiligten abzubilden. Weiterhin sollte die *aktivitätsspezifische Bereitstellung und Einbindung erarbeiteten Wissens* ermöglicht werden. Die Explizierung

<sup>151</sup> Vgl. Menz (1997), S.197ff.; vgl. Schwesinger et al. (2009), S.255ff.

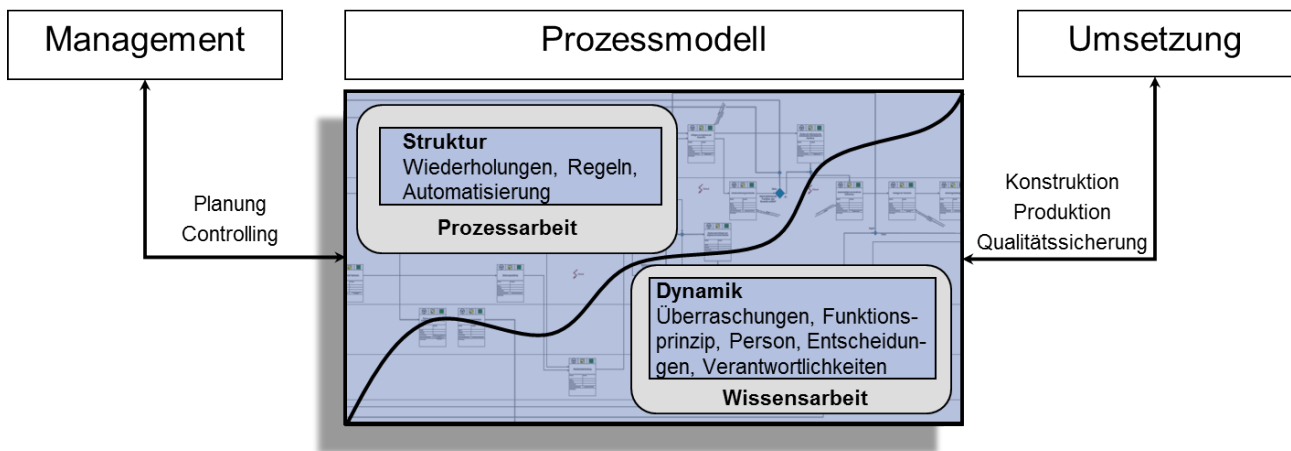
<sup>152</sup> Sonderforschungsbereich 499: „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“, vgl. SFB 499 (2011)

dieser Kompetenzen bildet die Grundlage für die Durchführung integrierter Produktentstehungsprozesse in der urformenden Mikrosystemtechnik und bietet damit die Möglichkeit, die Nachhaltigkeit des SFB zu erhöhen. Dieses Prozesswissen lässt sich mit entsprechenden Prozessmodellen geeignet darstellen.

Der tatsächliche (Ist-) Projektverlauf unterscheidet sich im Allgemeinen vom geplanten (Soll-) Projektverlauf. Um diesen Zusammenhang auch prozessmodellseitig abbilden zu können, werden Implementierungsmodelle (präskriptiv, Soll) und Anwendungsprozessmodelle (deskriptiv, Ist) unterschieden. Ein Referenzprozessmodell entsteht aus der Verallgemeinerung projektspezifischer Anwendungsprozessmodelle und besitzt generische Eigenschaften. Dadurch wird es möglich, vom Referenzprozessmodell zur Planung ähnlicher Projekte Implementierungsmodelle abzuleiten, die an die Gegebenheiten des neuen Projekts (z.B. Zeit, Ressourcen) adaptiert sind.<sup>153</sup>

### 2.7.1 Managementunterstützung vs. Bearbeiterunterstützung

Die aus Management- und Bearbeitersicht teilweise gegenläufigen Anforderungen an die Prozessmodellierung sind in Abbildung 2.27 dargestellt.<sup>154</sup>



**Abbildung 2.27** Das Referenzprozessmodell muss zu Projektplanung und -Controlling als auch zur Unterstützung von Wissensarbeit genutzt werden können. Eigene Darstellung in Anlehnung an Wohland / Wiemeyer (2006) in Meboldt (2008), S. 26 und S. 136

Während Managementunterstützung typischerweise bedeutet, im Referenzprozessmodell einen möglichst großen Anteil an Formalisierung und Struktur zu realisieren, benötigen die Bearbeiter zur Umsetzung des Prozesses unter der geforderten Wissensarbeit ein gewisses Maß an Dynamik (z.B. durch Zulassen nicht geplanter aber im Laufe des Prozesses benötigter Rekursionen) und die aktivitätsangepasste Bereitstellung unterstützender Informationen im

<sup>153</sup>Vgl. Albers / Meboldt (2007); vgl. Albers (2010)

<sup>154</sup>Vgl. auch Albers et al. (2011b)

Referenzprozessmodell.<sup>155</sup> Dazu muss ein passendes Abstraktionsniveau gefunden werden. Einerseits soll das Referenzprozessmodell so allgemeingültig sein, dass es nicht nur für einen spezifischen, sondern für jegliche Produktentstehungsprozesse in der urformenden Mikro-Produktion genutzt werden kann. Andererseits muss es genau genug sein, um die Bearbeiter während der Durchführung der jeweiligen Aktivitäten mit den benötigten Informationen versorgen zu können.

Zur Erstellung eines solchen Referenzprozessmodells des SFB 499, das gleichermaßen das Management wie auch den Prozessbearbeiter unterstützt, wurden die benötigten Produktentstehungsaktivitäten im PEP der Mikro-Gasturbine (vgl. Kap. 2.5) aufgezeichnet. Hierzu eigneten sich die bislang verfügbaren Mikro-PEP-Modelle nicht. Diese sind zwar generisch nutzbar und bilden die allgemeinen Vorgehensweisen für bestimmte disziplin- oder technologiespezifische PEP ab. Gleichzeitig ist ihr Abstraktionsniveau aber zu hoch, um damit konkrete Implementierungsprozessmodelle aufbauen zu können. Daher wurde ein alternativer Ansatz verfolgt, der auf dem iPeM als Metamodell<sup>156</sup> und den Tools „Aixperano“ sowie „Microsoft Visio“ zur EDV-Unterstützung aufbaute.

### 2.7.2 Eigenschaften des zu speichernden Mikro-PEP-Wissens

Der hier im Fokus stehende PEP besaß zu Beginn der Arbeiten am Referenzprozessmodell die folgenden Eigenschaften:

Zum einen ist der PEP *komplex*, da komplexe Einzeltechnologien<sup>157</sup> miteinander kombiniert werden und aufeinander aufbauen. Außerdem ist er organisatorisch und räumlich verteilt, da am KIT und an der Universität Freiburg verschiedene Institute eingebunden sind und kooperieren. Ein dieser Kooperation zugrunde liegendes Referenzprozessmodell war bislang nicht explizit verfügbar.

Zum anderen ist der PEP *kompliziert*. Die vorliegenden Erkenntnisse zum Referenzprozessmodell wurden hauptsächlich durch die Analysen von drei verschiedenen PEP gewonnen, die während der Erstellung der Demonstrationssysteme durchlaufen wurden.<sup>158</sup>

Viele einzelne Aktivitäten des PEP sind gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an Wissensarbeit (z.B. die Aktivität „Funktions- und Gestaltmodellierung“). Diese Aktivitäten durchlaufen viele Rekursionsschleifen, bis ein akzeptables Ergebnis vorliegt. Hier liegt ein großes Potential zur Zeit- und Kostenersparnis, das genutzt werden kann durch Optimierung des Referenzprozesses.

Schließlich ist der PEP *personengebunden*. Das Prozesswissen liegt nur implizit vor

<sup>155</sup>Vgl. Meboldt (2008), S. 136 ff.

<sup>156</sup>vgl. Albers / Meboldt (2007): „With the help of this reference model it is possible to describe the independencies of the process and specific development processes can be derived from this model, with a standardized backbone process.“

<sup>157</sup>Mikro-PIM, Mikro-EDM, Mikroguss, etc.

<sup>158</sup>Vgl. Albers et al. (2006b); vgl. Bauer et al. (2010); vgl. Albers et al. (2011c)

und eine reibungslose Umsetzung und Durchführung basiert vor allem auf gewonnenen Erfahrungen, guter interpersoneller Zusammenarbeit und Kooperation. Allerdings ist die Personalfuktuation unter den beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeitern relativ hoch und beträgt im Schnitt 3-5 Jahre. Dadurch wird zwar der Wissenstransfer aus der Forschung in die Industrie begünstigt, die Fortführung der bislang im SFB angesiedelten Tätigkeiten aber erschwert.

### 2.7.3 Geschäftsprozessmodellierung

Geschäftsprozesse lassen sich in Kern-, Management- und unterstützende Prozesse einteilen.<sup>159</sup> Kernprozesse beinhalten dabei alle Aktivitäten, die direkten Kundennutzen erzeugen. Diese werden durch unterstützende Prozesse ermöglicht und begleitet. Im Gegensatz dazu umfassen Managementprozesse alle Aktivitäten die benötigt werden, um Unternehmensziele zu definieren, die Prozessabläufe im Unternehmen zu überwachen und das Erreichen von Zielen zu überprüfen. Zur Erstellung des Referenzprozessmodells „Mikrounformen“ lagen ausschließlich Kernprozesse im Fokus der Betrachtung.

Details zur Erstellung des Referenzprozessmodells können bei ALBERS<sup>160</sup> nachgelesen werden. Die inhaltliche Ausarbeitung des Referenzprozessmodells, eine erste Validierung und eine daran anschließende Weiterentwicklung des Modells wurde im Rahmen einer Diplomarbeit<sup>161</sup> unter Anleitung des Verfasser der vorliegenden Arbeit geleistet und ist dort im Detail beschrieben. Im Folgenden soll das zentrale Ergebnis der Diplomarbeit - das Referenzprozessmodell - dargestellt werden.

### 2.7.4 Referenzprozessmodell Mikrounformen

Das Referenzprozessmodell ist in Abbildung A.1 dargestellt. Es setzt 151 Einzelaktivitäten in Relation und bildet die notwendigen Interaktionen<sup>162</sup> zwischen 14 Akteuren<sup>163</sup> ab. Dadurch ist die Komplexität des Modells relativ groß, allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass ein Nutzer des Modells typischerweise nur mit einem vergleichsweise kleinen Ausschnitt des Gesamtmodells arbeitet. Lediglich der Projektleiter muss das Gesamtmodell im Blick behalten. Weiterhin enthalten die einzelnen Aktivitäten Hinweise auf zur Durchführung der Aktivität benötigte oder unterstützende Methoden, Werkzeuge, Hilfsmittel, etc. Damit werden sowohl allgemeine wie auch die im SFB entwickelten Methoden und Werkzeuge aktivitätsangepasst zur Verfügung gestellt und die Unterstützung des Bearbeiters umgesetzt.

<sup>159</sup>vgl. DIN EN ISO 9000 (2005)

<sup>160</sup>Vgl. Albers et al. (2011b)

<sup>161</sup>Vgl. Wildermuth (2011)

<sup>162</sup>Interaktionen sind über die Farbgebung und Anmerkungen im Textfeld einer Aktivität kodiert, da die Nutzung der typischen Verbindungspfeile bei der Größe des Modells nicht sinnvoll umsetzbar war

<sup>163</sup>Die Akteure sind repräsentiert durch einzelne sog. „Swimlanes“

### 2.7.5 Zwischenfazit

Übergreifende Prozessmodelle wie sie in Abschnitt 2.6 beschrieben wurden, eignen sich nicht zur detaillierten Unterstützung von Projektmanagern oder Entwicklungsingenieuren, da der Abstraktionsgrad zu hoch ist. Sobald Prozessmodelle aber ein Abstraktionsniveau besitzen, das es den angesprochenen Nutzergruppen ermöglicht, umfassende Unterstützung durch diese Modelle zu erfahren, werden diese Modelle sehr schnell sehr komplex und bleiben notwendigerweise auf eine oder wenige Produktionstechnologien beschränkt. Dieses gilt insbesondere für die sehr komplexen Technologien der Mikrosystemtechnik. Die Nutzung solcher Prozessmodelle behindert also in der Folge die Einbeziehung weiterer Technologien.

Das entwickelte Referenzprozessmodell, vgl. Abbildung A.1, illustriert also ein wesentliches Problem der Mikrosystemtechnik und führte beim Verfasser dieser Arbeit zu der Motivation, die Auswirkungen auf den Entwicklungsingenieur in der Mikrosystemtechnik genauer zu untersuchen.

Zusätzlich erkannte der Verfasser, dass die Systemkonstrukteure in der Mikrosystemtechnik nicht einem homogenen „Genre“ entstammen, sondern sich die Mikrosystemkonstrukteure aus vielen unterschiedlichen Disziplinen (Mikrosystemtechnik, Maschinenbau, Elektrotechnik, Physik, Chemie, etc.) rekrutieren. Das führt zu der Frage, welche Implikationen sich hierdurch für den Konstrukteur und den Konstruktionsprozess ergeben.

Um den Menschen im Mittelpunkt der Produktentstehung begreifen, seine Vorgehensweisen spezifizieren und durch deren Projektion auf die Mikrosystemtechnik resultierende Probleme identifizieren zu können, sollen im Folgenden die Grundlagen für Invention und für deren technische Realisierung zusammengefasst werden.

## 2.8 Kognitionspsychologie

*„Nihil est in intellectu, quin prius fuerit in sensu.“*<sup>164</sup>

Die Kognitionspsychologie ist ein Teilgebiet der Psychologie und beschäftigt sich mit der zentralen Frage, wie der Mensch zu Einsicht und Erkenntnis gelangt und wie daraus Wissen entsteht. Im Folgenden werden die wesentlichen Elemente und Schritte aufgezeigt, die die Grundlage für Erkenntnis und Einsicht bilden.

Zentrales Element für die Interaktion des Menschen mit der Umwelt ist sein Nervensystem.<sup>165</sup> Wesentliche Bestandteile des Nervensystems sind die Nervenbahnen, das Rückenmark sowie das Gehirn. Die Reize, die das Nervensystem übermittelt und weiterverarbeitet,

<sup>164</sup>(lat.) Nichts ist im Verstand, ohne vorher in den Sinnen gewesen zu sein. Giovanni Nevizano, Sylva nuptialis, 1521, zitiert in Franzén et al. (1971)

<sup>165</sup>Vgl. Reid / Yau (2003): *„After all, the sole purpose of the existence of the nervous system is to allow an organism to interact appropriately with its environment, external or internal.“*

entstehen ihrerseits in den Sinnesorganen des Organismus. Um nun den mit seiner Umgebung wechselwirkenden Menschen (z.B. während der Produktentstehung) besser zu verstehen, sollen im Folgenden die wesentlichen psychophysikalischen Vorgänge<sup>166</sup> beschrieben werden.

### 2.8.1 Die Sinne des Menschen

Die Sinne des Menschen sind die Quelle jeglicher Wahrnehmung. Bereits ARISTOTELES benennt und beschreibt in seiner Arbeit „De Anima“ die wesentlichen fünf menschlichen Sinne.<sup>167</sup> Er unterscheidet *Gesichtssinn*, *Gehörsinn*, *Geruchssinn*, *Geschmackssinn* und *Tastsinn*. Diese ursprünglichen Begriffe wurden in der modernen Wissenschaft durch entsprechende Fachbegriffe substituiert und um weitere Sinne, derer sich das Individuum vordergründig nicht bewusst ist und die deshalb zunächst unentdeckt blieben, ergänzt. Die Literatur bezeichnet und klassiert die menschlichen Sinne zwar leicht unterschiedlich, aber über die Sinne an sich und deren Beschreibung herrscht Konsens. Die folgende Auflistung orientiert sich am Konzept STERNBERGS<sup>168</sup>:

- Sehen (visuelle Empfindung; urspr. Gesichtssinn): dient zur Unterscheidung von hell/dunkel, Farbe, (relative) Lage und Orientierung, Tiefe, Gestalt, Bewegung
- Hören (auditive Empfindung): dient der Empfindung von Schall. Dieser wird charakterisiert nach seiner Frequenz und seines Schalldruckpegels. Weiterhin können räumliche Herkunft (Richtung) und Bewegung einer Schallquelle empfunden werden.
- Schmecken (gustatorische Empfindung): dient zur Unterscheidung der fünf grundlegenden Geschmacksrichtungen sauer, bitter, süß, salzig und umami (herzhaft).
- Riechen (olfaktorische Empfindung): nach OHLOFF<sup>169</sup> werden die Grundgerüche blumig, fruchtig, grün, würzig, holzig, harzig, animalisch und erdig unterschieden
- Hautsinne:
  - Druckempfindung (taktile und haptische Empfindung): die taktile Empfindung hat passiven Charakter und beschreibt die Fähigkeit, Berührtwerden zu detektieren. Im Gegensatz dazu umfasst die haptische Empfindung das aktive Erfühlen und Ertasten z.B. von Konturen, Größe, Oberfläche, Textur, Gewicht, etc.

<sup>166</sup>Die Psychophysik beschreibt die Zusammenhänge zwischen physischen Stimuli (Empfindungen, engl. „sensation“) und den daraus erwachsenden psychologischen Erlebnissen (Wahrnehmung, engl. „perception“), vgl. Sternberg (2004), S.117ff.

<sup>167</sup>Vgl. Aristoteles (1995), S.241ff.

<sup>168</sup>Vgl. Sternberg (2004), S.123ff.

<sup>169</sup>vgl. Ohloff (1990)

- Temperaturempfindung (Thermozeption) dient zur Empfindung von Wärme/Kälte. Diese Empfindung hängt ab von dem jeweiligen sog. „adaption level“. <sup>170</sup> So kann ein und dieselbe Temperatur von der gleichen Person mal als warm, mal als kalt empfunden werden, je nach Höhe einer zuvor empfundenen „Referenztemperatur“ (z.B. der wirkenden Umgebungstemperatur).
- Schmerzempfindung (Nozizeption): dient dem Menschen als Warnsignal, um drohenden Schaden frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls abzuwenden oder eingetretenen Schaden möglichst schnell zu kurieren. <sup>171</sup>
- Propriozeption:
  - Körperempfindung (kinästhetische Empfindung): dient zur Feststellung der Körperhaltung (Lage/Stellung einzelner Körperteile zueinander und im Raum) und zur kontrollierten Körperbewegung und -positionierung. <sup>172</sup>
  - Gleichgewicht (vestibuläre Empfindung): dient zur Feststellung und Einhaltung von Balance und Gleichgewicht sowie zur Einschätzung von translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit und Beschleunigung des Kopfes (und damit im Allgemeinen auch des Körpers). <sup>173</sup>

## 2.8.2 Empfindung

Die Sinne ermöglichen zunächst die Rezeption physischer Stimuli, die auf den Organismus einwirken. Diese Stimuli werden in elektro-chemische Reize umgewandelt und an Rückenmark und Gehirn weitergeleitet. Dieser Vorgang wird als *Empfinden* (engl. sensation) bezeichnet. <sup>174</sup>

## 2.8.3 Wahrnehmung

Die im vorhergehenden Abschnitt diskutierten Reize sind bislang lediglich Informationen, die, damit sie *Sinn ergeben*, weiterverarbeitet werden müssen. Dieses wird durch die Wahrnehmung (perception) geleistet, durch die erhaltene (vorgefilterte) Informationen organisiert, integriert, prozessiert und schließlich interpretiert werden. Diese Interpretation geschieht dabei vor dem Hintergrund bestehender Erwartungen, zuvor gemachter Erfahrungen und z.T. unter Berücksichtigung der individuellen kulturellen Prägung. <sup>175</sup> Die Übersetzung eines

<sup>170</sup>Vgl. Sternberg (2004), S.162

<sup>171</sup>Vgl. Sternberg (2004), S.162

<sup>172</sup>Vgl. Sternberg (2004), S.162: „*Kinesthesia is the sense that helps us ascertain our skeletal movements and positioning*“

<sup>173</sup>Vgl. Sternberg (2004), S.163

<sup>174</sup>Vgl. Reid (2000)

<sup>175</sup>Vgl. Sternberg (2004), S.116

olfaktorischen Reizes in eine semantische Beschreibung kommt beispielsweise durch den „Vergleich mit einem bekannten Geruchsmuster im Gedächtnisspeicher zustande“.<sup>176</sup> In ähnlicher Weise charakterisiert Weidenmann<sup>177</sup> die menschliche Informationsverarbeitung mittels der Transformations-, Elaborations-, Konstruktions- und Systemannahme. Die *Transformationsannahme* beinhaltet die Auffassung, dass gewonnene Sinneseindrücke (Empfindungen) durch die Wahrnehmung in einen prozessierbaren mentalen Code umgewandelt werden. Erst durch diese Codierung sind sie der Weiterverarbeitung zugänglich. Gleichzeitig mit der Codierung findet die *Elaboration* statt. Die Elaboration setzt das Wahrgenommene in Relation zu bereits vorhandenem Wissen und ermöglicht so die Einordnung und mentale Vernetzung des Wahrgenommenen, dessen Interpretation und Ergänzung. Dieses kann wiederum erst unter der *Konstruktionsannahme* geschehen. Diese beinhaltet die Auffassung, dass die mentale Repräsentation einer Realität nicht durch eine „Eins-zu-Eins“-Umsetzung derselben, sondern durch eine aktive Neu- bzw. Rekonstruktion auf Basis der erhaltenen Informationen gewonnen wird. Die *Systemannahme* schließlich besagt, dass die kognitive Verarbeitung einer Information immer systemisch - also unter Berücksichtigung ihrer Interaktion mit bereits vorhandenem Wissen - determiniert ist. Ein und dieselbe Information würde somit von demselben Individuum zu unterschiedlichen Zeitpunkten und somit vor dem Hintergrund unterschiedlicher Wissensstände und Erfahrungsschätze unterschiedlich prozessiert werden.<sup>178</sup>

#### 2.8.4 Schemata und mentale Modelle

Die oben genannte Interpretation einer Information basiert somit auf zuvor gewonnenen Schemata und resultiert selbst wiederum in der Generierung neuer Schemata.<sup>179</sup> Diese Schemata ermöglichen situations, an die Umgebung angepasstes, sinnvolles Handeln. Während Schemata das Handeln des Individuums in Routinesituationen und -aufgaben leiten, sind diese nicht mehr nützlich, wenn es zu unerwarteten Abweichungen von einer Routine oder zu gänzlich unbekanntem oder unerwarteten Situationen kommt, da es nicht für alle möglichen Situationen „vorgefertigte“ Schemata geben kann.<sup>180</sup> Um auch mit diesen Situationen umgehen zu können, nutzt der Mensch stattdessen zuvor von der Realität gebildete mentale Modelle.

Mentale Modelle können aufgefasst werden als aktive Konstrukte, die sowohl die aktuelle oder gewünschte Situation repräsentieren als auch Informationen beinhalten, wie man von

---

<sup>176</sup>Vgl. Ohloff (1990), S.4

<sup>177</sup>Vgl. Weidenmann (1988), S.20ff. zitiert in Dutke (1994), S.11

<sup>178</sup>Vgl. hierzu auch Dörner (1974), S.2 ff.

<sup>179</sup>Vgl. Finke et al. (1996), S.134f.: „Schemas are abstract knowledge structures that can include information about multiple objects and the relations among them. [...] Schemas specify the relations among several discrete categories, and these often cut across standard taxonomic boundaries.“

<sup>180</sup>Vgl. Finke et al. (1996), S.135



der einen zur anderen Situation gelangt.<sup>181</sup> Mentale Modelle sind komplex genug, um zu beschreiben, wie die Imagination in komplexen Vorgängen, z.B. in der Produktentwicklung abläuft.<sup>182</sup> Mentale Modelle können durch Analogiebildung zu anderen komplexen Systemen entstehen.<sup>183</sup> Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Analogiebildung und mentale Modelle beeinflusst werden durch bereits existierende Ideen und Technologien, die Teil des kulturellen Kontextes ihres Erschaffers sind.<sup>184</sup>

Die Informationsverarbeitung ist nicht ausschließlich vom Vorhandensein äußerer Reize abhängig<sup>185</sup>, sondern kann zum Teil vom Individuum bewusst reflektiert und beeinflusst werden<sup>186</sup>.

### 2.8.5 Erkenntnis

Die stimulus-response (S-R) Schule des Behaviourismus beschreibt den Prozess der Problemlösung als inkrementelles trial-and-error Vorgehen. Die Reize, die auf das Individuum einwirken, führen zu entsprechenden Reaktionen, das Individuum wird dabei als „black box“ aufgefasst. Die stimulus-response Schule ist heute in vielen Fällen widerlegt und gilt gemeinhin als überholt.

Die Gestalttheorie hingegen nutzt das Konzept der *Erkenntnis* als wesentliches Element im Prozess des Problemlösens.<sup>187</sup> Die Erkenntnis kann dabei auf Basis und unter Einbeziehung zuvor entstandener Wahrnehmung und der dabei gebildeten Schemata und mentalen Modelle auf zwei Arten entstehen. So kann Erkenntnis einerseits das Ergebnis bewusster analytisch-synthetischer Prozesse („Durchdenken“ eines Problems), aber andererseits auch das Ergebnis einer Eingebung - der sog. Intuition - sein. Das Hervortreten einer Erkenntnis mittels Intuition wird in der Literatur oft auch als „Aha-Effekt“<sup>188</sup>, „Geistesblitz“ oder „Heureka-Erlebnis“<sup>189</sup> umschrieben und verdeutlicht das schlagartige Erlangen einer Einsicht oder Erkenntnis. Das Konzept der Erkenntnis ist wesentlicher Bestandteil in der Beschreibung kreativer Prozesse, vgl. Abschnitt 2.9.2.

Erkenntnis basiert nach STACHOWIAK unbedingt auf den zuvor beschriebenen mentalen

<sup>181</sup> Vgl. Finke et al. (1996), S.135; vgl. auch Werkmann-Karcher / Rietiker (2010), S. 225 f.: „*Mentale Modelle sind Vorstellungen wie Bilder, Annahmen oder Geschichten vom Gegenüber, Organisationen sowie allen Aspekten der Welt [...]. Sie zeichnen sich durch eine gegenüber der Wirklichkeit reduzierte Komplexität aus [und] dienen der Steuerung von Wahrnehmung und Verhalten [...].*“

<sup>182</sup> Vgl. Finke et al. (1996), S.135: „*Mental models are complex enough that one can use them to describe how imagination operates in complex endeavors such as engineering design and scientific discovery. [...] Mental models provide a convenient way of conceptualizing how [...] physical systems operate.*“

<sup>183</sup> Vgl. Finke et al. (1996), S.135

<sup>184</sup> Vgl. Finke et al. (1996), S.135: „*For now, we note that even these elaborate forms of imagination are influenced by existing ideas and technologies that are part of their creator's cultural context [...].*“

<sup>185</sup> Vgl. Neisser, 1967 zitiert in Dutke (1994)

<sup>186</sup> Vgl. Dutke (1994), S.10

<sup>187</sup> Vgl. Finke et al. (1996), S.144ff.

<sup>188</sup> Vgl. Bühler (1907)

<sup>189</sup> Vgl. Mainzer (1988), S.629

Modellen und kann nur durch sie entstehen, „[...] indem sie auf das - passive oder aktive - Erfassen von etwas aus ist, vollzieht sie sich relativ zu bestimmten Subjekten, ferner selektiv - intentional selektierend und zentrierend - und in je zeitlicher Begrenzung ihres Original-Bezuges“.<sup>190</sup>

Duncker beschreibt im Kontext von „Lernen und partieller Einsicht“ verschiedene kognitive Mechanismen, durch die ein Individuum von einem Problem zur Lösung desselben gelangen kann. Unter anderem unterstreicht er mittels verschiedener Beispiele die Wichtigkeit des „mannigfaltigen Umgangs“ mit Dingen und Situationen und zählt sie zu den „Lösungen im Anschluß an das „instinktive“ Repertoire“.<sup>191</sup> Ein weiterer wichtiger, wenn auch als „trivialste und uneinsichtigste Form“ bezeichneter Mechanismus zur Lösungsfindung ist nach Duncker die „Findung durch Resonanz“.<sup>192</sup> Dabei wird die Lösung (im Sinne eines Sachverhalts oder eines Objekts) eines Problem gefunden durch Abgleich geforderter (antizipierter, signalisierter) Eigenschaften des Gesuchten mit bereits vorhandenen Sachverhalten oder Objekten im Wahrnehmungsfeld bzw. im Spurenfeld (Gedächtnis). Somit erklärt Duncker das Einbeziehen von Erfahrungen und gelernten Strukturen in den Problemlösungsprozess mit der Findung durch Resonanz. Ein von Duncker gegebenes Beispiel hierzu ist das Suchen nach etwas „Länglichem“, „Stockartigem“ (z.B. zum Hervorholen eines unter den Schrank gerollten Gegenstandes), das auf Basis der geforderten signalisierenden Merkmale zum Erkennen eines Schirms oder Lineals als adäquater Lösung führt. Während es nach Duncker „*ein-sichtigere Weisen der Lösungsfindung*“<sup>193</sup> - und somit geeignetere kognitive Mechanismen zur Systemsynthese - gibt, so vermutet der Autor dieser Arbeit, dass die Findung durch Resonanz wesentlich ist für die Analyse technischer Systeme. Dabei sind die „signalisierenden Merkmale“ eines zu analysierenden Objekts zwar nicht wie in obigem Beispiel explizit geäußert, aber ebenso vorhanden und wahrnehmbar. Um nun zu analysieren, um welches Objekt es sich handelt oder wie das fragliche Objekt typischerweise genutzt wird, werden die signalisierenden Merkmale identifiziert und ebenfalls nach dem zuvor beschriebenen Mechanismus mit dem Suchbereich (Wahrnehmungs- oder Spurenfeld) verglichen. Ergibt sich eine Übereinstimmung, ist das Individuum in der Lage, das fragliche Objekt einzuordnen, zu benennen und (unter Annahme entsprechender Anbindung an die Umwelt) Rückschlüsse auf seine Funktionsweise zu ziehen.

## 2.8.6 Intuition

Die *Ratio* ermöglicht es dem Menschen, unter bewusster Nutzung seines Verstandes Fakten zu sammeln, diese mit Erfahrungen zu kombinieren, die Tragweite des Ergebnisses eines

<sup>190</sup>Stachowiak (1973), S. 56

<sup>191</sup>Duncker (1963), S.85

<sup>192</sup>Vgl. Duncker (1963), S.89ff.

<sup>193</sup>Duncker (1963), S.89

geplanten Handelns oder Entscheidens zu erfassen, Überlegungen (unter Nutzung von Induktion und Deduktion) anzustellen und auf dieser Basis schließlich eine Handlung oder Entscheidung zu begründen.<sup>194</sup> Eine wesentliche Rolle zur Nutzung der Ratio spielt das Kurzzeitgedächtnis, das in der Lage ist, die vorgenannten Operationen bewusst auszuführen.<sup>195</sup>

Intuition hingegen ist stark emotional geprägt und wird oft als unbewusstes, gefühlsbetontes Kombinieren von Informationen, Erkennen von Mustern, Abwägen von Entscheidungen aufgefasst, das zu spontanem Erlangen von Einsicht und Hervortreten von Lösungen führt.<sup>196</sup>

*„Intuition nennen sie [Hirnforscher und Psychologen] jene Form unbewussten Wissens um Formen, Funktionen und Zusammenhänge, die ganz ohne Berechnung und Erklärung auskommt. Ein Wissen, das sich meist gar nicht formulieren lässt, weil Formeln fehlen. Das sich aber Ausdruck verschafft in der bildenden Kunst, in der Musik, aber auch täglich in Tausenden kleinen Entscheidungen des Alltagslebens. [...] Im Unterbewusstsein jedes Menschen lagern Wissensschätze, aus denen er täglich schöpft, ohne es zu merken.“<sup>197</sup>*

Intuition wird oft als Gegensatz zur Ratio verstanden, allerdings zeigt die Erfahrung, dass Intuition und Rationalität vielmehr als einander komplementär aufgefasst werden sollten.<sup>198</sup> Während Ratio insbesondere für die exakte Verarbeitung einer vergleichsweise kleinen Menge an Informationen<sup>199</sup> geeignet scheint, erlaubt Intuition die sehr schnelle Verarbeitung großer Mengen von Informationen großer Komplexität, auch unter gegebener Unsicherheit (z.B. Informationsdefizit).

*„Der Verstand [Ratio], den Menschen einsetzen, um vermeintlich kluge Entscheidungen zu treffen, ist begrenzt und macht nur einen kleinen Teil unseres tatsächlichen Wissens aus. [...] Dennoch handelt es sich, wenn wir eine Intuition haben, um den Abruf von Informationen, die wir irgendwann über unsere fünf Sinne wahrgenommen und gespeichert haben.“<sup>200</sup>*

Die Intuition stellt auf dem Weg zu Einsicht und Erkenntnis, vgl. Abbildung 2.28, eine wichtige Alternative dar.<sup>201</sup> Zwar existiert die Auffassung, dass Intuition ohne das *explizite* Verständnis der zugrunde liegenden Zusammenhänge, die sich vor allem in Schemata und

<sup>194</sup>Vgl. auch Berner (2002)

<sup>195</sup>Zur Modellierung der menschlichen Gedächtnisstruktur und zum Begriff Kurzzeitgedächtnis siehe Abschnitt 4.4.2

<sup>196</sup>Vgl. Jung (1986), S. 474 f.

<sup>197</sup>SPIEGEL ONLINE (2007)

<sup>198</sup>Vgl. auch Berner (2002)

<sup>199</sup>Vgl. Abschnitt 4.4.2: Die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses beträgt  $7 \pm 2$  Chunks

<sup>200</sup>Milton Fisher (vgl. Fisher (1995)), zitiert nach SPIEGEL ONLINE (2007)

<sup>201</sup>Vgl. hierzu Jung (1986), S. 398: „Die Intuition vermittelt allerdings zunächst bloß Bilder oder Anschauungen von Beziehungen und Verhältnissen [i.S.v. Schemata und mentalen Modellen], die mittels anderer Funktionen entweder gar nicht, oder nur auf großen Umwegen erreicht werden können.“

mentalenen Modellen ausdrücken, Einsicht und Erkenntnis generiert. Dennoch stellen auch hier Schemata und mentale Modelle die Grundlage für die Nutzung der Intuition dar.<sup>202</sup>

Der „Wirkungsort“ der Intuition in Abbildung 2.28 kann durch die Aussage von Jung weiter eingegrenzt werden, wonach „[...] die Intuition die Mitwirkung der Empfindung ausschließt [...]“<sup>203</sup>. Die Intuition wird durch die Empfindung am stärksten behindert, weil diese als bewusste Sinnesfunktion in der Lage ist, die für die Intuition unwesentlichen Reize stärker zu betonen und wichtige Reize in den Hintergrund zu rücken. Daher müsse im Moment der Intuition die Empfindung möglichst stark unterdrückt werden.<sup>204</sup>

### 2.8.7 Erweiterung der Beobachtbarkeit

Reichen die Möglichkeiten des Menschen zur direkten *Empfindung* von Sachverhalten durch Aufnahme von Reizen nicht mehr aus, um ein Objekt zu beobachten und zu analysieren, können Messgeräte zwischen Objekt und Mensch geschaltet werden. Diese Messgeräte dienen gewissermaßen als „Adapter“ zwischen zu beobachtendem Objekt und dem Menschen. Dieser Adapter ist in der Lage, durch den Menschen nicht direkt aufnehmbare Reize in eine Form zu konvertieren, die dem Menschen durch seine Sinne wieder zugänglich ist. Die Empfindung des Objekts basiert also in dem Falle auf „indirekten“ Reizen<sup>205</sup>. Erkenntnistheoretisch betrachtet existiert kein Unterschied zwischen der „direkten“ Beobachtung mithilfe der Sinne und der „indirekten“ Beobachtung mithilfe von Messgeräten.<sup>206</sup>

### 2.8.8 Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Erkenntnis auf der Möglichkeit der *Empfindung* eines Objekts basiert. NACHTIGALL fasst diese Tatsache wie folgt zusammen:

*„Grundlage eines jeden Erkennens bleibt das Hinschauen, das Zusehen, wie etwas ist. Demgemäß sind unsere Sinnesorgane die ersten Beobachtungsinstru-*

<sup>202</sup>Vgl. Werkmann-Karcher / Rietiker (2010), S. 226: „Nach Kleebauer (2007, S. 99) [Kleebauer (2007)] sind erfahrungsbasierte, mentale Modelle 'eng verbunden mit handlungsleitenden Orientierungsgefühlen (vgl. Heller, 1981) und führen letztlich zur intuitiven Verhaltenssteuerung und Entscheidungsfindung'.“

<sup>203</sup>Jung (1986), S. 434 f.

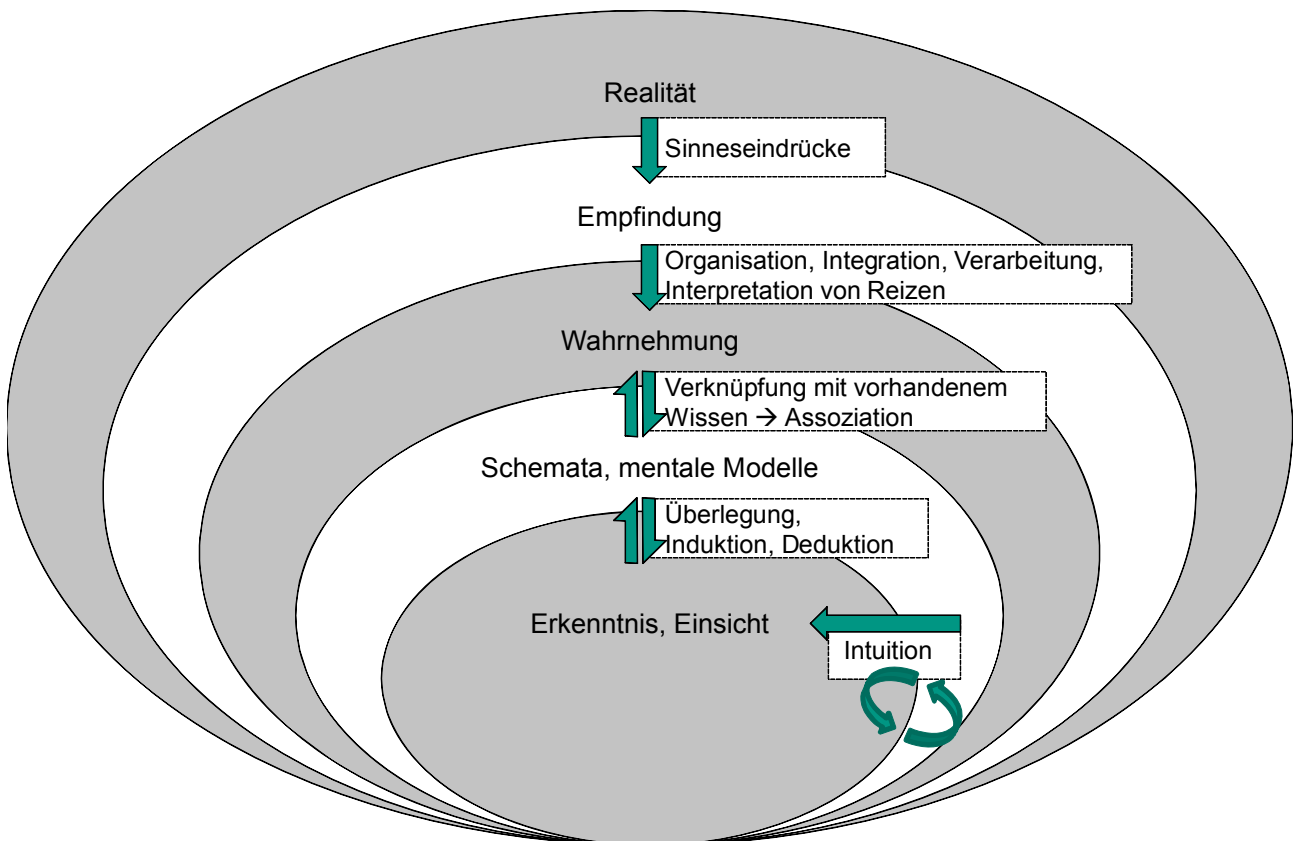
<sup>204</sup>Vgl. Jung (1986), S. 398 f.

<sup>205</sup>Die hier genutzten Begrifflichkeiten der direkten und indirekten Reize ist nicht zu verwechseln mit den bereits geprägten Prinzipien der „direkten bzw. indirekten Messung“. Diese drücken aus, dass ein zu messender Vorgang, wenn er aus technischen Gründen nicht direkt messbar ist, auf „Umwegen“ unter Ausnutzung vorhandener und bekannter Korrelationen zu einem messtechnisch besser zugänglichen Vorgang trotzdem erfasst werden kann, z.B. indirekte Temperaturmessung durch Messung der Volumenexpansion einer Quecksilbermenge unter Erwärmung.

<sup>206</sup>Vgl. Nachtigall (2010), S. 16 f.: „Im erweiterten Sinn ist all das beobachtbar, was mit Messgeräten erfassbar ist. Auch hier sind die Erscheinungen wieder gefiltert durch die Übertragungscharakteristiken dieser Geräte. Es besteht nur ein quantitativer, kein qualitativer Unterschied zwischen der Beobachtung mit unseren Sinnesorganen und der Analyse mit Geräten. [...] Erkenntnistheoretisch bestehen aber keine Unterschiede zwischen dem Beobachten mit Sinnesorganen und dem Beobachten mit Instrumenten. [...] Der Einsatz von Messgeräten führt zwar nicht erkenntnistheoretisch, aber doch praktisch weiter [...]“

*mente. Beobachtbar ist zunächst all das, was mit unseren Sinnen erfassbar ist. Wir beobachten einen Gegenstand mit den Modalitäten, die unseren Sinnen eigen sind. [...] Wenn ein Gegenstand eine Funktion ausführt und wenn wir 'zusehen', 'zuhören', 'befühlen', 'beriechen' und 'begreifen', bekommen wir Informationen über den Gegenstand und das, was er macht.“<sup>207</sup>*

Die Art und Weise, wie die Begriffe dieses Kapitels zusammenhängen und aufeinander aufbauen, ist in Abbildung nochmals visualisiert.



**Abbildung 2.28** Visualisierung des Zusammenhangs zentraler Begriffe der Kognitionspsychologie auf Basis der in diesem Unterkapitel diskutierten Grundlagen.

Der unterschiedlichen Lehrkonzepten<sup>208</sup> zugrunde liegende „Grad des Behaltens“ ist anhand der angestellten Überlegungen zur Art und Weise, wie der Mensch zur Erkenntnis gelangt, direkt zu erklären.

Grad des Behaltens<sup>209</sup>:

- Hören: 20%
- Sehen: 30%
- Hören + Sehen: 50%

<sup>207</sup>Nachtigall (2010), S. 15 f.

<sup>208</sup>Vgl. „Karlsruher Lehrmodell für Produktentwicklung KaLeP“ Albers et al. (2003a), Albers et al. (2006a)

<sup>209</sup>Vgl. Universität Duisburg-Essen (2012)

- Eigene Erarbeitung: 90%

Dieses impliziert, dass die Informationsspeicherung und -verarbeitung umso höher ist, je mehr Sinnesorgane an der Informationsaufnahme beteiligt sind.<sup>210</sup>

## 2.9 Intelligenz, Kreativität, Analogie

Bis ins 20. Jahrhundert hinein wurden Intelligenz und Kreativität als positiv miteinander korreliert betrachtet. Demgegenüber existiert heute in der Kreativitätsforschung die differenziertere Auffassung, dass im Allgemeinen zwar ein gewisses Maß an Intelligenz notwendig ist, um kreative Leistungen zu erbringen. Allerdings korrelieren Intelligenz und Kreativität nur unterhalb eines Grenzwerts positiv miteinander.<sup>211</sup> Oberhalb dieses Grenzwerts geht ein erhöhter Intelligenzwert nicht mehr zwangsläufig mit erhöhter Kreativität einher<sup>212</sup> und umgekehrt deuten ab diesem Grenzwert große kreative Leistungen nicht zwangsläufig auf besonders hohe Intelligenz. Dieser Zusammenhang zwischen Intelligenz und Kreativität ist in Abbildung 2.29 schematisch dargestellt.

### 2.9.1 Intelligenz

Historisch betrachtet wurde Intelligenz als Ausprägung psychophysischer Leistungen (Motorik, Sinnesschärfe und Körperkraft/-belastbarkeit) betrachtet.<sup>213</sup> Diese Auffassung wurde Anfang des 20. Jahrhunderts abgelöst von der Auffassung, dass Intelligenz sich ausdrückt in der Ausprägung mentaler, beurteilender Fähigkeiten. Binet<sup>214</sup> nutzte hierzu die Ausprägung der Elemente „direction“<sup>215</sup>, „adaptation“<sup>216</sup> und „criticism“<sup>217</sup>.

#### Intelligenzquotient

Auf dem Ansatz Binets aufbauend wurden Tests zur Messung der einzelnen Elemente entwickelt. Um die Ergebnisse dieser Tests zusammenzuführen, wurden „Intelligenzniveaus“ – das sog. „mentale Alter“ einer Versuchsperson – gebildet. Damit konnte das Intelligenzniveau einer Versuchsperson bestimmten Alters in Relation gesetzt werden zum durchschnittlichen Intelligenzniveau von Personen gleichen Lebensalters. Ein Vergleich der Intelligenzniveaus

<sup>210</sup>Vgl. Universität Duisburg-Essen (2012)

<sup>211</sup>Getzels / Jackson (1962) ermittelten in ihren Studien einen Grenzwert bei IQ = 120

<sup>212</sup>vgl. Sternberg (1995), S. 366

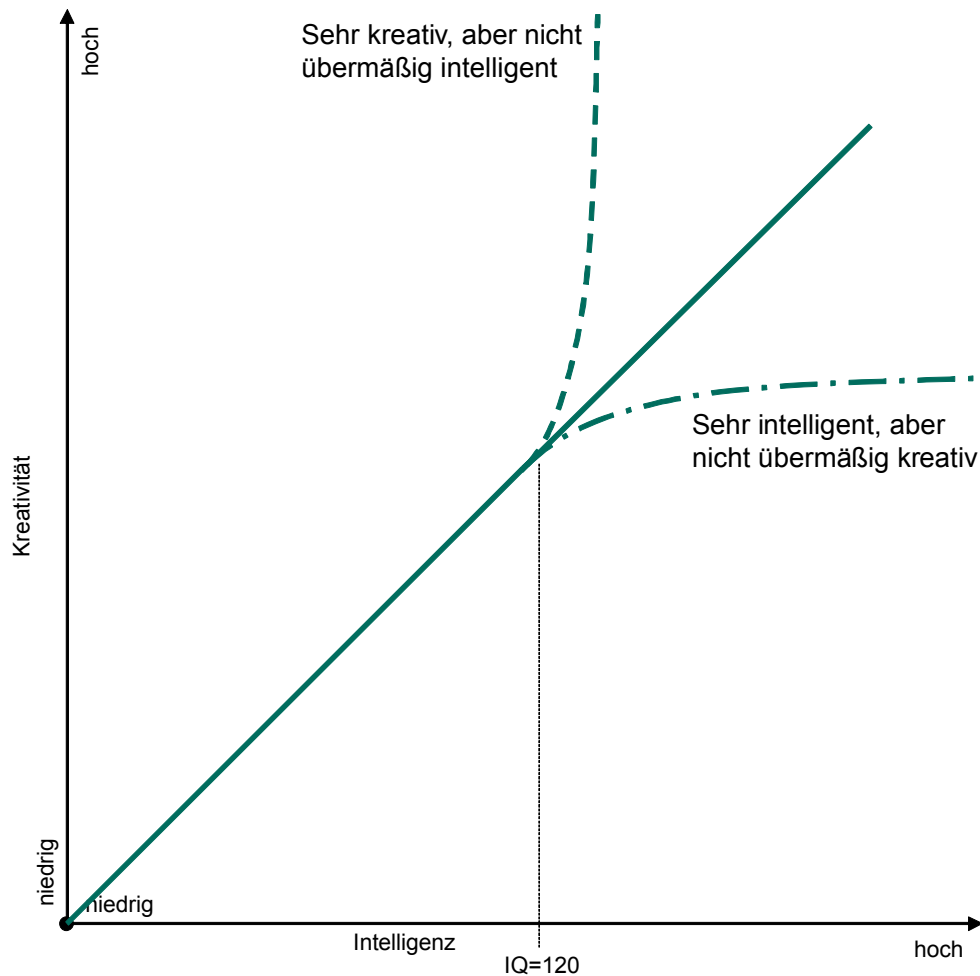
<sup>213</sup>Vgl. Sternberg (2006), S. 487

<sup>214</sup>Vgl. Binet / Simon (1916) in Sternberg (2006), S. 488

<sup>215</sup>„Die Fähigkeit zu wissen, was zu tun ist und wie dieses zu tun ist“ Sternberg (2006), S. 488

<sup>216</sup>„Anpassen einer Strategie zum Lösen einer Aufgabe und gleichzeitiges Beobachten, ob die angepasste Strategie erfolgreich ist“ Sternberg (2006), S. 488

<sup>217</sup>„Kritisches Hinterfragen der eigenen Gedanken und Handlungen“ Sternberg (2006), S. 488



**Abbildung 2.29** Zur Korrelation von Intelligenz und Kreativität (Erläuterungen im Text).

von Personen unterschiedlichen Lebensalters wurde allerdings erst durch eine weitere Modifikation zur Auffassung des Intelligenzniveaus möglich. Durch die Relation des mentalen Alters zum Lebensalter einer Person entstand die klassische Definition des Intelligenzquotienten (IQ)<sup>218</sup>:

$$IQ = \frac{\text{Mentales Alter}}{\text{Lebensalter}} \cdot 100$$

Der Intelligenzquotient wurde im Laufe der Zeit weiterentwickelt, um z.B. die Tatsache abzubilden, dass das Intelligenzalter langsamer zunimmt als das Lebensalter.

### Intelligenztheorien und -modelle

Die einflussreichsten Theorien zur Struktur der Intelligenz sind nach Sternberg die Theorien von Spearman, Thurstone, Guilford, Cattell, Vernon und Carroll<sup>219</sup>, auf die im Folgenden basierend auf der Darstellung Sternbergs eingegangen werden soll.

<sup>218</sup>Vgl. Stern in Sternberg (2006), S. 488

<sup>219</sup>Vgl. Sternberg (2006), S. 492 ff.

**Zwei-Faktoren-Theorie von Spearman** Nach Spearman<sup>220</sup> kann das Intelligenzniveau eines Menschen im Wesentlichen durch einen allgemeinen, übergeordneten, sog. „g-Faktor“<sup>221</sup> repräsentiert werden. Dieser Faktor korreliert mit allen Bereichen mentaler Leistungsfähigkeit (z.B. mentale Kapazität, Geschwindigkeit der Informationsaufnahme und -verarbeitung, etc.). Die „Feinjustage“ des Intelligenzniveaus erfolgt darauf aufbauend durch Berücksichtigung untergeordneter, spezifischer Faktoren, durch die die unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten eines Menschen in verschiedenen Bereichen Berücksichtigung finden (z.B. bei mathematischen oder verbalen Operationen).

**Thurstones Primärfaktorenmodell** Thurstone hingegen sieht die Intelligenz nicht repräsentiert in einem übergeordneten Faktor, sondern drückt sie mittels der sieben folgenden, sogenannten Primärfaktoren aus<sup>222</sup>:

- Verbal comprehension: die passive Fähigkeit im Umgang mit Worten (Verständnis, Interpretation,...)
- Verbal fluency: die aktive Fähigkeit im Umgang mit Worten (Finden von Synonymen)
- Inductive reasoning: die Fähigkeit zur Weiterentwicklung gegebener Reihen oder Herstellung von Relationen unter Nutzung von logischem Schlussfolgern und Analogien
- Spatial visualization: die Fähigkeit zur räumlichen Wahrnehmung und Vorstellung
- Number: die Fähigkeit zum Umgang mit einfachen mathematischen Aufgaben
- Memory: die Leistungsfähigkeit des Gedächtnisses
- Perceptual speed: die Auffassungsgabe bzw. Geschwindigkeit der Wahrnehmung

**„Fluid“ und „crystallized general intelligence“ nach Cattell** Cattell<sup>223</sup> vereint in seinem Intelligenzmodell die Auffassungen Spearman's (dessen Assistent er war) bezüglich eines Generalfaktors und Thurstones bezüglich interkorrelierender Primärfaktoren.<sup>224</sup> Er prägt dabei insbesondere die Faktoren „fluid intelligence“ und „crystallized intelligence“. *Fluid intelligence* beinhaltet die Fähigkeit der Adaption an neue Probleme oder Situationen durch abstrakt-logisches Denken. Diese Fähigkeit ist nach Cattell angeboren und wird nicht durch die Umwelt beeinflusst.<sup>225</sup> *Crystallized intelligence* umfasst hingegen „[...] kognitive Fertigkeiten, in denen sich die kumulierten Effekte vorangegangenen Lernens kristallisiert und verfestigt hätten.“<sup>226</sup>

<sup>220</sup>Vgl. Spearman (1904), S. 268 ff.

<sup>221</sup>Abk. f. „general factor“

<sup>222</sup>Vgl. Sternberg (2006), S. 493 f.

<sup>223</sup>Vgl. Cattell (1971)

<sup>224</sup>Vgl. Amelang / Bartussek (1990), S. 201 ff.

<sup>225</sup>Vgl. Sternberg (2006), S. 494; vgl. Amelang / Bartussek (1990), S. 201

<sup>226</sup>Amelang / Bartussek (1990), S. 201



**Guilfords SOI Modell** Die zuvor besprochenen Faktorenmodelle versuchen, die Intelligenz mit lediglich einem oder nur wenigen Faktoren zu erfassen. Guilford hingegen fasst Intelligenz in dem von ihm entwickelten Structure-of-Intellect (SOI) Modell als Summe der Interaktionen dreier im Folgenden beschriebenen Dimensionen auf, wodurch bis zu 150 Einzelfaktoren entstehen. Dazu nutzt er die drei Dimensionen „Inhalte“, „Prozesse bzw. Denkopoperationen“ und „Produkte“.<sup>227</sup> Der dem Modell zugrunde liegende Ansatz ist, dass die Informationen der Inhaltsklasse durch Nutzung der Operationenklasse in die Produktklasse überführt werden können.

Das Modell ist im Gegensatz zu den bis dahin propagierten hierarchischen Modellen zur Beschreibung von Intelligenz morphologisch aufgebaut, d.h. die genutzten drei Klassifikationen (Inhalte, Operationen, Produkte) sind orthogonal zueinander, sodass ein bestimmter Faktor einer Klasse mit jedem Feld der anderen beiden Klassen kombiniert werden kann, um jeweils eine einzigartige, spezielle Fähigkeit zu beschreiben.<sup>228</sup> In Summe ergeben sich 120 dieser Fähigkeiten.<sup>229</sup> Das Modell wurde im Laufe der Zeit auf 150 Fähigkeiten erweitert und gewisse hierarchische Abhängigkeiten fanden Eingang. Im Folgenden wird aber lediglich das ursprünglich vorgeschlagene Modell weiterverfolgt.<sup>230</sup>

In seinem Modell weist Guilford den in der Psychologie typischerweise zur Beschreibung des „Denkens“ genutzten Begriffen *induktives* und *deduktives Denken* seinen Operationsfaktoren *Kognition* sowie *Konvergentes Denken* zu.

Durch die Möglichkeit, jeden dieser Operationsfaktoren auf vier unterschiedliche Inhaltsfaktoren anzuwenden, um damit sechs verschiedene Produktfaktoren generieren zu können, erlaubt eine weitere Unterteilung jeder dieser Operationsfaktoren in weitere 24 Möglichkeiten.<sup>231</sup>

Jede Dimension des SOI wird weiter differenziert in einzelne Faktoren, vgl. Abbildung 2.30.

Guilford ordnet die kreative Produktion der Prozessdimension zu, die zwischen konvergentem und divergentem Denken (convergent production, divergent production) differenziert. Während konvergentes Denken auf die Produktion der *einen* richtigen Lösung abzielt und damit den Schlüssel zur Intelligenz darstellt, ist das divergente Denken, das auf die Produktion *vieler* Lösungen zu einem Problem abzielt, die Grundlage für Kreativität.

Guilford war ein Pionier in der Untersuchung und Charakterisierung des Phänomens des *kreativen Denkens*. Mithilfe speziell hierfür entwickelter empirischer Untersuchungsmethoden

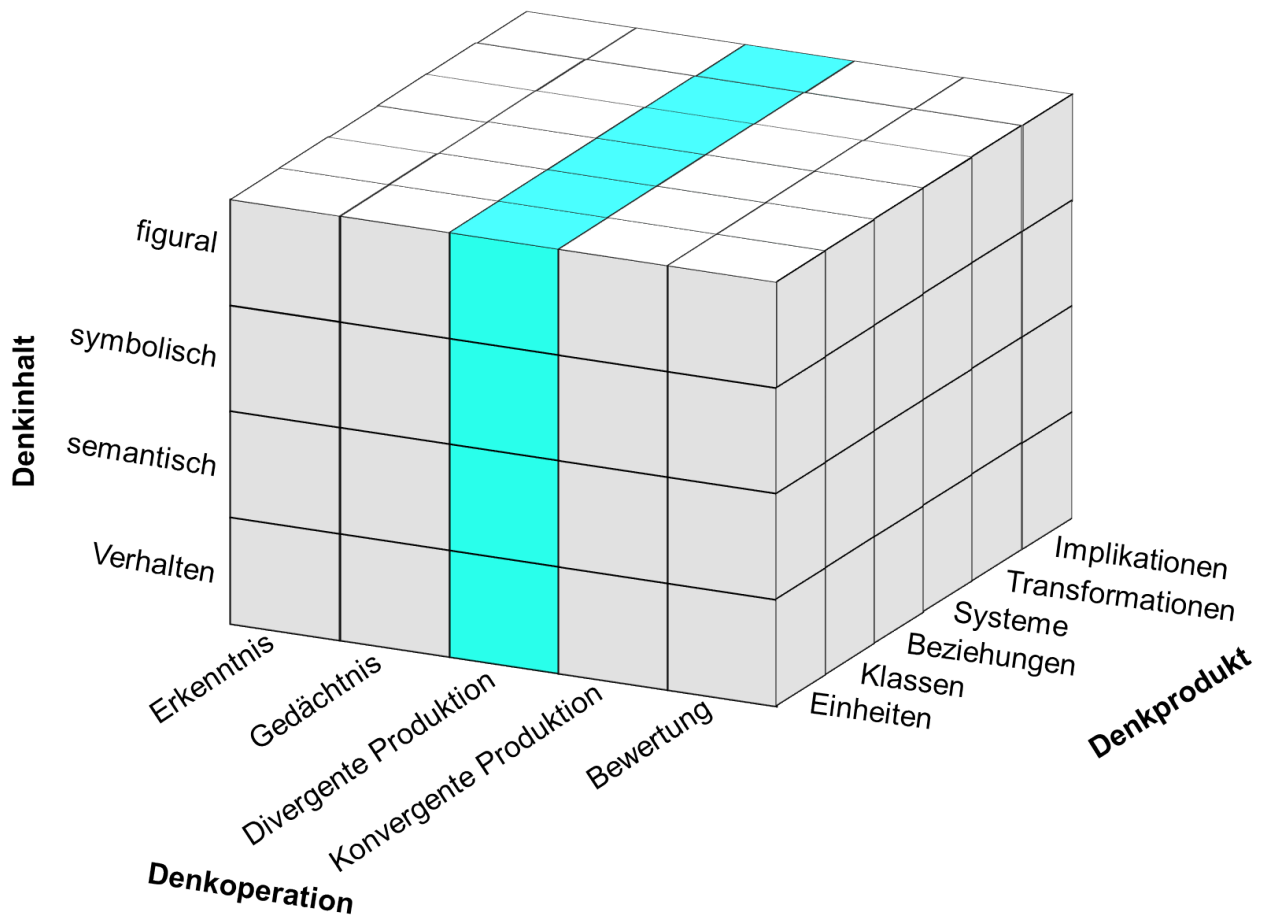
<sup>227</sup> Guilford / Hoepfner (1976), S.31ff.; vgl. Amelang / Bartussek (1990), S. 206 ff.

<sup>228</sup> Vgl. Guilford / Hoepfner (1976), S.32; vgl. Amelang / Bartussek (1990), S. 207 ff.

<sup>229</sup> Der visualisierte Quader aus Abbildung 2.30 besitzt die Dimensionen 4 Inhaltsfaktoren x 5 Operationsfaktoren x 6 Produktfaktoren = 120 Fähigkeiten, die als kleine Würfel repräsentiert sind und somit den Gesamtquader aufbauen

<sup>230</sup> Interessant anzumerken ist, dass dieses Modell Ähnlichkeiten zur elektronischen Datenverarbeitung (Eingabe - Verarbeitung - Ausgabe) sowie zum iPeM (Zielsystem - Handlungssystem - Objektsystem) aufweist. Die Tatsache, dass der Grundaufbau des iPeM den kognitiven Prozessen bei intellektuellen Vorgängen ähnelt, stützt die grundlegende Idee, den Menschen mit seinen Denkweisen in den Mittelpunkt des PEP zu stellen.

<sup>231</sup> Vgl. Guilford / Hoepfner (1976), S.436f.



**Abbildung 2.30** Guilfords Theorie „Structure of Intellect“ zur Beschreibung intellektueller Vorgänge. Der Raum wird durch die drei Dimensionen „Inhalte“, „Prozesse“ und „Produkte“ aufgespannt. Diese drei Dimensionen werden zur Spezifizierung weiter unterteilt in Faktoren. Eigene Darstellung in Anlehnung an Guilford / Hoepfner (1976), S.34f.

konnte er zeigen, dass kreatives Denken beschrieben werden kann durch die Begriffe „Ideenflüssigkeit“ sowie „[...] Flexibilität von Informationen und der Ausarbeitung des Gegebenen“. Kreatives Denken - insbesondere die Ideenflüssigkeit - ordnet er somit vor allem der Kategorie „divergente Produktion“ zu, die die Generierung logischer Alternativen zum Ziel hat.<sup>232</sup>

Auch Funke<sup>233</sup> vertritt die Auffassung, dass bei kreativen Denkprozessen das divergente Denken vorherrscht. Hierbei steht das Auffinden unüblicher Assoziationen, der Wechsel von Perspektiven und die Erweiterung des Horizonts im Vordergrund. Diese Art des Denkens ist die Grundlage für die Schaffung alternativer Lösungen zu einem Problem. In der darauf folgenden Lösungsauswahl steht dann allerdings wieder das konvergente Denken im Vordergrund, das logisch-analytisch die gegebenen Lösungsalternativen vor dem Hintergrund zuvor definierter Kriterien auf die gewünschte Anzahl reduziert.

Zwar wird das GUILFORDS SOI Modell heutzutage ambivalent diskutiert, allerdings hat

<sup>232</sup>Vgl. Guilford / Hoepfner (1976), S.437

<sup>233</sup>Vgl. Funke (2000), S.289f.

die durch ihn geprägte Abgrenzung von konvergentem und divergentem Denken heute noch immer Bestand.<sup>234</sup> DE BONO entwickelte auf dieser Basis seine Auffassung des lateralen Denkens. Er bezeichnet Laterales Denken als „[...] *Musterwechsel innerhalb eines musterbildenden Systems [und] als Fähigkeit, die Welt aus einem anderen Blickwinkel zu sehen.*“<sup>235</sup>

**Multiple Intelligenz nach Gardner** Die klassischen Intelligenztheorien versuchen, die Intelligenz eines Individuums dadurch messbar und vergleichbar zu machen, dass Teilergebnisse von Einzelaufgaben unterschiedlichster Bereiche bewertet und zu einem einzigen Wert, dem Intelligenzquotienten, zusammengeführt werden. Gardner stellt diesen Ansatz in Frage und schlägt stattdessen seinen Ansatz der „Multiplen Intelligenzen“ vor<sup>236</sup>. Im wesentlichen zielt dieser Ansatz darauf ab, nicht alle kognitiven Leistungen gegeneinander aufzusummieren, um sie in der Folge einer Mittelwertbildung zu unterwerfen, sondern die Intelligenz eines Individuums auf typische „Gebiete“ zu beziehen. Diese Gebiete orientieren sich an der Lebenswirklichkeit, die lehrt, dass Individuen auf einem Gebiet herausragende Leistungen erbringen können (und damit hohe Intelligenz auf diesem Gebiet besitzen), während sie auf anderen Gebieten unterdurchschnittlich begabt sind. Während der Intelligenzquotient die überdurchschnittlichen Leistungen auf dem einen Gebiet mit den unterdurchschnittlichen Leistungen auf dem anderen Gebiet in einer Zahl zusammenfasst, ergibt sich mit Gardners Ansatz ein detaillierteres, der Erfahrungswirklichkeit besser entsprechendes Bild. Gardner schlägt in seiner ersten Arbeit zu dem Thema sieben voneinander abgrenzbare und unabhängige Gebiete und zugehörige Intelligenzen vor: linguistische, musikalische, logisch-mathematische, räumliche, körperlich-kinästhetische sowie die personalen Intelligenzen (intra- und interpersonal).

Die *linguistische Intelligenz* umfasst den Umgang mit Worten und der Sprache in geschriebener und gesprochener Form. Eine ausgeprägte linguistische Intelligenz ist typisch für Personen, die die Sprache ausgeprägt als „Werkzeug“ einsetzen, wie z.B. Schriftsteller, Moderatoren, Schauspieler, etc.<sup>237</sup> Die *musikalische Intelligenz* bezieht sich auf den Umgang mit Harmonien und Rhythmik zur Rezeption, Interpretation und Komposition von Musik. Überdurchschnittlich hohe musikalische Intelligenz zeigen daher Personen wie Komponisten, Dirigenten, Sänger, etc.<sup>238</sup> Bei der *logisch-mathematischen Intelligenz* stehen Fähigkeiten zum

<sup>234</sup>Vgl. Funke (2000)

<sup>235</sup>De Bono (2005), S. 85

<sup>236</sup>vgl. Gardner (1985), S.3ff.: „*Yet it should be equally clear that current methods of assessing the intellect are not sufficiently well hined to allow assessment of an individual's potentials or achievements [in different fields of activity]. The problem lies less in the technology of testing than in the ways in which we customarily think about the intellect and in our ingrained views of intelligence. Only if we expand and reformulate our view of what counts as human intellect will we be able to devise more appropriate ways of assessing it and more effective ways of educating it.*“

<sup>237</sup>Vgl. Gardner (1985), S.73ff.

<sup>238</sup>Vgl. Gardner (1985), S.99ff.

analysierenden und schlussfolgernden Denken im Vordergrund. Das Aufstellen und Lösen mathematischer Zusammenhänge basiert auf diesen Fähigkeiten. Da die (Natur-) Wissenschaften eng verwandt sind mit der Mathematik, nimmt die logisch-mathematische Intelligenz auch auf diesem Gebiet eine Schlüsselstellung ein. Diese Intelligenz zeichnet neben den vorgenannten Mathematikern und (Natur-) Wissenschaftlern z.B. auch Schachspieler, Strategen, etc. aus.<sup>239</sup> Die *räumliche Intelligenz* bezeichnet Fähigkeiten des dreidimensionalen Vorstellungsvermögens, die Ausdrucksfähigkeit durch bildlich/räumliche Darstellung und die Einschätzbarkeit von Entfernungen. Diese Fähigkeiten werden in besonderer Weise genutzt durch Architekten, Nutzer geographischer Karten (KFZ-Fahrer, Piloten, Bootsfahrer), Bildhauer, etc.<sup>240</sup> *Körperlich-kinästhetische* Intelligenz bezeichnet die Fähigkeit eines Individuums, seinen Körper zu steuern und sich über ihn „auszudrücken“, wie es z.B. Schauspieler, Tänzer oder Moderatoren/Präsentatoren machen. Weiterhin kann die körperlich-kinästhetische Intelligenz genutzt werden, um durch entsprechendes („geschicktes“) Bewegen des Körpers oder einzelner Körperteile bestimmte Tätigkeiten durchzuführen, wie es z.B. Techniker, Handwerker, Chirurgen, etc. typischerweise einsetzen.<sup>241</sup> Schließlich grenzt Gardner die *intrapersonale* und die *interpersonale Intelligenz* ab. Darunter ist die emotionale Selbst- bzw. Fremdwahrnehmungsfähigkeit zu verstehen, also die Fähigkeit, seine eigenen Empfindungen und Gefühle zu verstehen bzw. sich in andere Personen hineinversetzen zu können. Auf dieser Basis lassen sich seine eigenen Handlungen steuern bzw. ein Gegenüber beeinflussen. Diese Intelligenzen sind typischerweise ausgeprägter bei Politikern, Soziologen, Lehrern, etc.<sup>242</sup>

**Sternbergs triarchische Theorie** Sternberg<sup>243</sup> fasst die Intelligenz analog zu Gardner als aufgeteilt auf unterschiedliche Bereiche auf, betont aber im Gegensatz zu Gardner, der die Trennung der verschiedenen Bereiche hervorhebt, deren Interaktion.

Diese Interaktionen drücken sich aus in der Relation der Intelligenz zu<sup>244</sup>:

- der internalen Welt,
- der Erfahrung,
- der externalen Welt.

Für die weitere Diskussion sollen die Performancekomponenten als ein Teil der Relation der Intelligenz zur internalen Welt genannt sein.<sup>245</sup> Diese beinhalten Fähigkeiten und (Lösungs-)

<sup>239</sup>Vgl. Gardner (1985), S.128ff.

<sup>240</sup>Vgl. Gardner (1985), S.170ff.

<sup>241</sup>Vgl. Gardner (1985), S.205ff.

<sup>242</sup>Vgl. Gardner (1985), S.237ff.

<sup>243</sup>Vgl. Sternberg (2006), S. 509 ff.

<sup>244</sup>Vgl. Amelang / Bartussek (1990), S. 216 ff.

<sup>245</sup>Vgl. Sternberg (2006), S. 510

Strategien, die bereichs- und disziplinspezifisch anwendbar sind. So erfordert die Lösung einer mathematischen Aufgabe andere Strategien als das Modellieren einer Plastik in der bildenden Kunst.

### Zwischenfazit

Zwar unterscheiden die meisten Modelle zwischen verschiedenen Teilbereichen der Intelligenz, fassen die Summe der Leistungsfähigkeit in diesen Teilbereichen dann aber zu einem einzigen Intelligenzwert, z.B. dem IQ, zusammen. Auf diesem lässt sich dann z.B. ein Intelligenzquotient berechnen. Ein gegensätzliches Konzept verfolgt Gardner mit seiner Theorie der multiplen Intelligenzen, das unterschiedliche Bereiche der Intelligenz und unterschiedliche Leistungsfähigkeiten in diesen Bereichen bestehen lässt und sie nicht in einem übergeordneten Faktor zusammenzufassen versucht.

## 2.9.2 Kreativität

*„Der Ausdruck Kreativität ist ein Nomen, das ein Phänomen benennt, bei dem eine Person ein neues Konzept (das Produkt) kommuniziert.“<sup>246</sup>*

Die Literatur spezifiziert den Begriff „Kreativität“ durch die Unterscheidung des kreativen Individuums, des kreativen Prozesses, des kreativen Produkts (Guilford) sowie des kreativen Umfelds. Diese Unterteilung des Kreativitätsbegriffs<sup>247</sup> hilft, eine praxisorientierte Unterteilung vorzunehmen und damit die Forschung zu „Kreativität“ zu strukturieren.

### Die 4 Determinanten der Kreativität

Der Begriff „Kreativität“ kann mithilfe der vier Determinanten der Kreativität (4P) person, process, product und press unterteilt und damit spezifiziert werden. Das Konzept der vier Determinanten der Kreativität geht zurück auf Rhodes.<sup>248</sup>

Die Forschung zum kreativen Individuum zielt darauf ab, die Ursprünge von „Kreativität“ zu beleuchten und beschreibt die typischen Wesenszüge kreativer Personen anhand ihrer Persönlichkeitsmerkmale.

Der kreative Prozess beschreibt modellhaft die typischen Denkvorgänge eines Individuums bei der Generierung eines kreativen Produkts.

Das kreative Produkt kann als Manifestation des kreativen Wirkens eines Individuums mittels kreativer Prozesse verstanden werden.

<sup>246</sup>Rhodes (1961), im Original: „*The word creativity is a noun naming the phenomenon in which a person communicates a new concept (which is the product).*“ zitiert in Deigendesch (2009), S. 52

<sup>247</sup>die sog. 4P's der Kreativität: person, process, product, press, vgl. Rhodes (1961)

<sup>248</sup>vgl. Rhodes (1961)

Schließlich umfasst die Determinante „press“ die Eigenschaften des Umfelds in Bezug auf die kreative Leistungsfähigkeit. Das Umfeld kann sowohl förderlich als auch hinderlich auf die Kreativität einer Person wirken.

**Die kreative Person** Das kreative Potential einer Person korreliert bis zu einem Schwellenwert mit ihrem Intelligenzquotienten.<sup>249</sup> Darüber hinaus existieren aber weitere Persönlichkeitseigenschaften, die das kreative Potential einer Person beeinflussen. Neben einem gewissen Grad an Intelligenz wirken weitere Persönlichkeitseigenschaften auf das kreative Potential von Individuen. „[Hierzu gehören] *Unabhängigkeit, Nonkonformismus, unkonventionelles Verhalten, weitgespannte Interessen, Offenheit für neue Erfahrungen, Risikobereitschaft sowie kognitive und verhaltensmäßige Flexibilität [...]*“.<sup>250</sup>

Die Persönlichkeitseigenschaft „Offenheit für Erfahrungen“ gehört als eine Dimension zu den sog. „Big Five“, die weiteren Dimensionen sind „Neurotizismus“, „Extraversion“, „Verträglichkeit“ und „Rigidität“. In der Persönlichkeitspsychologie werden die Big Five zur Beschreibung der Persönlichkeit genutzt.<sup>251</sup> McCrae<sup>252</sup> umschreibt „Offenheit für Erfahrungen“ als Persönlichkeitseigenschaft, die mit „*Phantasie, Kreativität, wissenschaftlicher Neugierde, unkonventioneller Geisteshaltung und divergentem Denken assoziiert ist*“.<sup>253</sup> In Studien konnte gezeigt werden, dass die Ausprägung der „Offenheit für Erfahrungen“ positiv mit divergentem Denken<sup>254</sup> und damit insbesondere mit der Kreativität einer Person korreliert<sup>255</sup>.

Peterson und Carson<sup>256</sup> gehen davon aus, dass die in Studien gemessene positive Korrelation zwischen „Offenheit für Erfahrungen“ und „Kreativität“ zu erklären sei durch eine herabgesetzte „latente Inhibition“.<sup>257</sup> In ihren Studien stellten sie fest, dass kreative Probanden leichter abgelenkt werden konnten, als weniger Kreative. Diese Offenheit für Sinneseindrücke führt demnach zu einem erhöhten Informationsfluss, der verarbeitet werden muss und dabei ein erhöhtes Potential für die Erzeugung origineller Gedanken erzeugt.<sup>258</sup>

**Der kreative Prozess** ARNOLD und GUILFORD<sup>259</sup> fassen den kreativen Prozess als Problemlösungsprozess auf, da die Wiederangleichung von SOLL- und IST durch den Problemlö-

<sup>249</sup>vgl. Abbildung 2.29

<sup>250</sup>Nach Matindale (1989) und Simonton (1999) in Funke (2000)

<sup>251</sup>Vgl. Amelang / Bartussek (1990), S. 345 ff.; McCrae (1994); Saggino (2000)

<sup>252</sup>Vgl. McCrae (1994)

<sup>253</sup>Peterson / Carson (2000): „*Openness is a high-order trait, associated with personality attributes such as imagination, creativity, intellectual curiosity, unconventional attitudes, and divergent thinking (McCrae, 1994).*“

<sup>254</sup>Vgl. Abschnitt 2.9.1

<sup>255</sup>Vgl. McCrae (1987)

<sup>256</sup>Vgl. Peterson / Carson (2000), Peterson et al. (2002)

<sup>257</sup>Dieser Begriff beschreibt in der Kognitionspsychologie die kognitive Filterung von Reizen, also die Unterscheidung relevanter von irrelevanter Information. Dieser Mechanismus dient dazu, eine Reizüberflutung im Gehirn zu verhindern und ist im Gedächtnismodell nach Dörner (vgl. Abschnitt 4.4.2) als kennzeichnender Mechanismus des Ultrakurzzeitgedächtnisses modelliert.

<sup>258</sup>Vgl. auch Zec (2012)

<sup>259</sup>zitiert in Landau (1971), S. 15

sungsprozess kreatives Denken bedingt.

Im Gegensatz zur populären Vorstellung, dass Kreativität stattfindet in einem Geistesblitz, der „auf direktem Wege“ vom Problem zu dessen Lösung führt, fasst die Kognitionspsychologie die kreative Lösung eines Problems als Prozess auf, der in typische Phasen untergliedert werden kann. Ursprünglich unterscheidet WALLAS im kreativen Prozess vier aufeinander folgende Phasen: Präparation, Inkubation, Illumination, Evaluation.<sup>260</sup> FUNKE ergänzt als fünfte Phase die Ausarbeitung oder Elaboration.<sup>261</sup>

Die Phase der *Vorbereitung* beinhaltet vor allem die eingangs genannte Forderung, dass ein Individuum, um auf einem Gebiet kreativ zu sein, sich zuvor intensiv mit der Thematik beschäftigt haben und grundlegendes Fachwissen besitzen muss. Als *Inkubationsphase* wird die Zeit zwischen Formulierung eines Problems und seiner Lösung bezeichnet. In dieser Zeit beschäftigt man sich zwar nicht bewusst mit dem Problem, unterbewusst arbeitet das Gehirn aber weiter an der Lösung des Problems durch Schaffung assoziativer Verknüpfungen zwischen gesammeltem Wissen, Erfahrungen, Ideen, Vorstellungen.<sup>262</sup> Bestehende Verknüpfungen können durch neue Eindrücke verändert, ergänzt oder überlagert werden. Diese unterbewusste Tätigkeit des Gehirns lässt sich nicht aktiv beeinflussen. Eine Idee zur Lösung des Problems tritt in der Phase der *Einsicht* in das Bewusstsein und wird greifbar bzw. artikulierbar. Diese Idee wird von Funke beschrieben als „rekombinierte Assoziation“.<sup>263</sup> Die Phase der *Verifikation* dient als Filter, in der die in der Illumination gefundenen Ideen kritisch vor dem Hintergrund von z.B. Normen, Werten aber auch zuvor definierten Anforderungen oder Randbedingungen, die an die Lösung eines Problems gestellt werden, bewertet werden. In dieser Phase wird entschieden, ob ein Ergebnis der Illuminationsphase weiterverfolgt werden soll oder nicht. Die Phase der *Elaboration* dient dazu, die Ergebnisse der Illuminationsphase weiter auszuarbeiten und zu konkretisieren. Diese Phase ist stark mit der Phase der Verifikation verknüpft, da die Entscheidung, ob eine erste Idee weiterverfolgenswert erscheint, oft erst nach weiterer Konkretisierung (also Elaboration) getroffen werden kann. Andernfalls ergibt sich die erhöhte Gefahr gute Lösungen zu verwerfen, weil ihr Potential nicht erkannt oder nicht richtig eingeschätzt wurde.

**Das kreative Produkt** Die Fachliteratur bezeichnet ein Produkt als „kreativ“, wenn die beiden charakteristischen Merkmale Neuigkeit und Angemessenheit/ Nützlichkeit erfüllt sind. Die „Neuigkeit“ eines Produkts liegt dabei natürlich im Auge des Betrachters. Hat er von einem bereits zuvor entwickelten, ähnlichen Produkt im selben Anwendungskontext noch nicht gehört, wird er das Produkt als neu bezeichnen. Das Anlegen des Merkmals „Angemessenheit bzw. Nützlichkeit“ setzt das Produkt in Relation zu gegebenen Anforderungen

<sup>260</sup> sog. 4-Phasenmodell nach Wallas (1926), S. 79 ff.

<sup>261</sup> vgl. Funke (2000)

<sup>262</sup> vgl. Finke et al. (1996)

<sup>263</sup> vgl. Funke (2000)

und Randbedingungen und hinterfragt seine Funktionalität.<sup>264</sup> Dadurch werden Konstrukte ausgeschlossen von der Kategorie kreativer Produkte, die zwar neu in Ihrer Erscheinung, aber weder nützlich sind oder gegebene Anforderungen und Randbedingungen einhalten.

**Das kreative Umfeld** STERNBERG und LUBART führten Studien zur Kreativität verschiedener Probanden durch.<sup>265</sup> Dadurch identifizierten sie die Umgebung als einen wesentlichen Faktor, der auf die Kreativität wirkt. So können Entscheidungsfreiheit, unerwartete Bekräftigungen, positives Innovationsklima oder ein stimulierendes Milieu kreativitätsförderlich wirken. Andererseits können Druck von Kollegen, Druck durch Supervision oder Druck durch erwartete Evaluation kreativitätshemmend wirken.

### Die Bedeutung der Analogiebildung

Die Bildung mentaler Modelle basiert wie in Abschnitt 2.8.4 beschrieben auf gesammelten Empfindungen und deren Weiterverarbeitung durch das Individuum und dient dazu, gesammeltes Wissen strukturiert abzulegen, bei Bedarf zur Verfügung zu stellen sowie gegebenenfalls abzuändern oder zu erweitern. Basierend auf den Erkenntnissen und Auffassungen von COLLINS und GENTNER<sup>266</sup> kommt Dutke zu dem Schluss, dass „*Mentale Modelle [...] kognitive Konstruktionen [sind], die zu einem beträchtlichen Teil auf Analogiebeziehungen aufbauen*“.<sup>267</sup>

Hofstadter geht noch einen Schritt weiter und bezeichnet die Analogiebildung als „Kern der Kognition“:

*„One should not think of analogy-making as a special variety of reasoning (as in the dull and uninspiring phrase ‘analogical reasoning and problem-solving’, a long-standing cliché in the cognitive-science world), for that is to do analogy a terrible disservice. After all, reasoning and problem-solving have (at least I dearly hope!) been at long last recognized as lying far indeed from the core of human thought. If analogy were merely a special variety of something that in itself lies way out on the peripheries, then it would be but an itty-bitty blip in the broad blue sky of cognition. To me, however, analogy is anything but a bitty blip – rather, it’s the very blue that fills the whole sky of cognition – analogy is everything, or very nearly so, in my view.“*<sup>268</sup>

Finke, Ward und Smith<sup>269</sup> fassen die Entstehung kreativer Ideen nicht als einen einzelnen

<sup>264</sup>vgl. Funke (2000)

<sup>265</sup>Vgl. Sternberg / Lubart (1999)

<sup>266</sup>Vgl. Collins / Gentner (1987), S.243

<sup>267</sup>Dutke (1994), S.18

<sup>268</sup>Hofstadter (2001)

<sup>269</sup>Vgl. Finke et al. (1996); vgl auch Smith et al. (2011), S. 35



kognitiven Prozessschritt auf, sondern beschreiben sie in ihrem Ansatz der „kreativen Kognition“ als Aneinanderreihung verschiedener kognitiver Mechanismen. Die wesentlichen Schritte hierbei sind Problemlösung (i.S.d. Problemeingrenzung), Konzeptionalisierung, Analogiebildung, induktive Übertragung, konzeptionelle Kombination und Visualisierung. Die Analogiebildung spielt hierbei die zentrale Rolle, da in ihr der eigentliche kreative Impuls entsteht. Durch sie entsteht die Erkenntnis und der „Aha-Effekt“ beim Betrachten einer zuvor subjektiv ungelösten Fragestellung.<sup>270</sup> Auf die Tätigkeiten in der Entwicklung projiziert nimmt die Analogiebildung zwei Schlüsselstellungen ein. Dieser kognitive Mechanismus ist einerseits der Schlüssel zur kreativen Synthese von Systemen, andererseits ist er ebenso wichtig für deren Analyse um zu verstehen, wie ein System funktioniert.

Funke<sup>271</sup> listet in Anlehnung an Sternberg<sup>272</sup> Erfolgsfaktoren für die Erhöhung kreativen Outputs auf. Eine dieser Empfehlungen lautet: *„Benutzen Sie Analogien und divergentes Denken, wo immer möglich.“*. Damit wird deutlich, welchen Stellenwert Analogien für den Erfolg bei der Erzeugung kreativer Ergebnisse einnehmen.

### 2.9.3 Analogiebildung

#### Begriffsdefinition Analogie

Der Begriff „Analogie“ stammt vom griechischen Wort *analogía* ab, was übersetzt „Entsprechung, Ähnlichkeit, Gleichheit von Verhältnissen“ bedeutet.<sup>273</sup> Charakteristisch für eine Analogie ist dabei eine strukturelle, auf einer gemeinsamen Funktion beruhende Ähnlichkeit, nicht lediglich eine Ähnlichkeit aufgrund gleicher phylogenetischer (entwicklungsgeschichtlicher) Herkunft.<sup>274</sup>

#### Analogien und Metaphern

Metaphern und Analogien sind eng miteinander verwandt, eine häufig genutzte Abgrenzung ist durch das Verhältnis von Metapher und Analogie gegeben.<sup>275</sup> Hentschel beschreibt Metaphern als „implizite, unausgepackte Analogie“ und umgekehrt Analogien als „ausgeführte Metaphern“.

#### Was sind Analogien?

---

<sup>270</sup>Vgl. Smith et al. (2011)

<sup>271</sup>Vgl. Funke (2000)

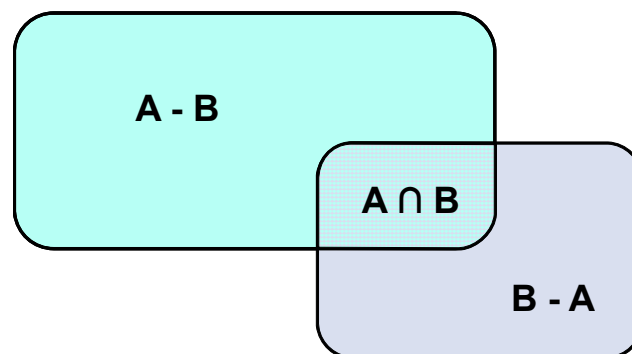
<sup>272</sup>Vgl. Sternberg (1995), S. 363 f.

<sup>273</sup>Vgl. Bibliographisches Institut GmbH (2012)

<sup>274</sup>Vgl. ReeseOnline e.K. (2012)

<sup>275</sup>Vgl. Hentschel (2010), S. 16 ff.

**Tversky** Die Ähnlichkeit zweier Objekte  $a$  und  $b$  ist nach Tversky<sup>276</sup> beschreibbar über die Ähnlichkeit ihrer Merkmalsmengen  $A$  und  $B$ . Die Merkmalsmenge eines Objekts ist gegeben durch die Summe aller dieses Objekt charakterisierender und diesem Objekt zuordenbare Merkmale. Zur Beschreibung der Ähnlichkeit nutzt Tversky zwei Kriterien: die Größe der sich überlappenden Merkmalsschnittmenge (symbolisch dargestellt als  $A \cap B$ ) und die beiden sich ergebenden Komplementärmengen (symbolisch dargestellt als  $A - B$  und  $B - A$ ). Die Stärke einer Ähnlichkeit zweier Objekte  $a$  und  $b$  ist dann umso höher, je größer einerseits die Überlappung der Schnittmenge  $A \cap B$  und je kleiner die Komplementärmengen  $A - B$  und  $B - A$  sind, vgl. Abbildung 2.31.



**Abbildung 2.31** Tverskys „contrast model“ zur Charakterisierung von Ähnlichkeit. Eigene Darstellung in Anlehnung an Tversky (1977).

Die Übertragung von Tverskys Ansatz auf Analogien würde bedeuten, dass die Stärke einer Analogie lediglich abhängig ist von einer möglichst großen Überlappung der Merkmale des Basis- und Zielbereichs bei gleichzeitig möglichst wenigen nicht-überlappenden „Restmerkmalen“. Dieses widerspricht der gängigen Auffassung und Erfahrung von Analogien. So sind nicht alle Merkmale für eine hilfreiche, gelungene, starke Analogie gleichermaßen relevant. Einzelne Merkmale können für eine Analogie besonders relevant, andere besonders irrelevant sein und damit die Stärke der Analogie determinieren.<sup>277</sup> Aus diesem Grund entwickelte Gentner<sup>278</sup> die „structure-mapping“ Theorie.

**Gentner** In der structure-mapping Theorie charakterisiert Gentner eine Analogie insbesondere als Übertragung von *Relationen* zwischen Objekten, weniger als Übertragung von *Merkmalen* (wie bei der oben beschriebenen Ähnlichkeitsbetrachtung ausschließlich gegeben). Diese Übertragung findet von einem Basisbereich (source, base, analogue) auf den Zielbereich (target, codomain) statt. Bei den übertragenen Relationen handelt es sich Gentner zufolge insbesondere um „higher order relations“, also syntaktisches Wissen, nicht domänenspezifisches Wissen.<sup>279</sup> Somit dienen Analogien dazu, bekannte Merkmale und

<sup>276</sup>Vgl. Tversky (1977)

<sup>277</sup>Vgl. Gentner (1983)

<sup>278</sup>Vgl. Gentner (1983)

<sup>279</sup>Vgl. Gentner (1983)

insbesondere ihre Relationen von einem Basisbereich auf einen Zielbereich übertragen.

**Holyoak** Holyoak<sup>280</sup> nennt drei Randbedingungen (Constraints), die während der Analogiebildung zum Tragen kommen und die Kohärenz einer Analogie bestimmen:

1. **Similarity:** Um eine Analogiebildung anstoßen zu können, muss eine grundlegende Ähnlichkeit zwischen den Elementen (Objekten, Situationen, etc.) der Analogiequelle (source domain) und des Analogieziels (target domain) erkannt werden.<sup>281</sup>
2. **Structure:** Erkennen von tiefenstrukturellen Parallelen zwischen Analogiequelle und -ziel bei oberflächlich betrachteter Unterschiedlichkeit. Eine strukturelle Ähnlichkeit ist bei Isomorphismen maximal, da Isomorphismen Quelle und Ziel bijektiv (eindeutig, umkehrbar eindeutig) verknüpfen.<sup>282</sup>
3. **Purpose:** Die Nutzung von Analogien geschieht immer vor dem Hintergrund eines bestimmten Zwecks, und dieser Zweck leitet die Auswahl von Analogien.<sup>283</sup>

### Klassierung von Analogien

Auf Basis wissenschaftstheoretischer Literatur zu Analogien klassiert Hentschel<sup>284</sup> Analogien auf die folgende Weise:

1. horizontale<sup>285</sup> versus vertikale<sup>286</sup> Analogien;
2. kurzreichweitige (naheliegende) versus langreichweitige (ferne, weithergeholte) Analogien;
3. substantive (materielle oder physische) versus formale (mathematische oder strukturelle) Analogien;
4. attributive Analogien (analogia attributionalis) versus funktionelle Analogien<sup>287</sup>;
5. visuelle versus verbal repräsentierte Analogien;
6. tiefe (ergiebige bzw. starke) versus flache (platte bzw. schwache) Analogien;

<sup>280</sup>vgl. Holyoak / Thagard (1996), S. 5 f.

<sup>281</sup>vgl. Holyoak / Thagard (1996), S. 22 ff.

<sup>282</sup>In der Mathematik ist die Isomorphie Grundlage z.B. der Laplace-Transformation, die ohne bijektive Abbildung nicht durchführbar wäre.

<sup>283</sup>Holyoak / Thagard (1989), S. 297; vgl. ebd. S. 302

<sup>284</sup>Vgl. Hentschel (2010), S. 27 ff.

<sup>285</sup>horizontale Analogie: Analogie im „herkömmlichen“ Sinne als Übertragung zwischen zwei nebeneinanderstehenden Wissensgebieten

<sup>286</sup>vertikale Analogie: analogiebasierte Übertragung innerhalb eines Wissensgebiets, z.B. Quelle: Materie zusammengesetzt aus kleineren Teilchen (Atomen) – Ziel: Atome zusammengesetzt aus kleineren Teilchen (Protonen, Neutronen, Elektronen)

<sup>287</sup>vgl. Abschnitt 2.9.3: Mapping von Merkmalen (attributiv) vs. Mapping von Relationen (funktional)

7. positive versus negative Analogien (Keynes)<sup>288</sup>;
8. heuristische<sup>289</sup> versus rechtfertigende<sup>290</sup> Analogien;
9. illustrative versus komparative Analogien.

### Kognitive Mechanismen bei der Analogiebildung

Die Fachliteratur unterteilt den Prozess der Analogiebildung typischerweise in vier<sup>291</sup> bzw. fünf<sup>292</sup> Teilprozessschritte. Die *Auffindung* (retrieval) beschreibt den Schritt, in dem Quell- und Zielbereich identifiziert werden. Darauf aufbauend findet der *Transferprozess* (mapping) statt, in dem die Merkmale und Relationen des Quell- auf den Zielbereich (und ggf. umgekehrt) übertragen werden. Der Schritt der *Evaluation* dient zur Bewertung der gebildeten Analogie. Dabei können Analogien in die oben gegebene Klassierung eingeordnet werden. Die darauffolgende *Abstraktion* (learning) der gebildeten Analogie ermöglicht es, die der Analogie zugrunde liegende Struktur zu erfassen, in einem mentalen Modell abzuspeichern und zukünftig gegebenenfalls wiederzuverwenden. Diesen in der Literatur typischerweise genannten ersten vier Schritten fügt HENTSCHEL noch den fünften Schritt der *Ausarbeitung* hinzu. Hierdurch kann eine Analogie weiter verfeinert werden, um eine noch bessere Übereinstimmung zwischen Quell- und Zielbereich zu erhalten.

Funke<sup>293</sup> listet in Anlehnung an Sternberg<sup>294</sup> Erfolgsfaktoren für die Erhöhung kreativen Outputs auf. Neben der in Abschnitt 2.9.2 bereits zitierten Empfehlung lautet eine weitere, dass man „[...] soviel Wissen über [seinen] Bereich wie möglich“ sammeln soll, um zu verhindern, „[...] dass das Rad zum 100. Mal erfunden wird“. Gleichzeitig soll man aber darauf achten, sich nicht zu sehr an dieses Wissen zu klammern. Wie man auf diesen Dualismus aber konkret reagieren soll, bleibt unklar.

## 2.10 Skalierung

Werden die Eigenschaften eines Systems um einen bestimmten Faktor der Art verändert, dass bestimmte Proportionen erhalten bleiben, spricht man von Skalierung. Die Skalierung geht typischerweise von einem als Referenz genutzten Grundentwurf aus und vergrößert oder

<sup>288</sup>dient zur Unterscheidung von übertragbarem und nicht-übertragbarem Anteil des Basis- und Zielbereichs einer Analogie. Hentschel präferiert hierfür die Begriffe Analogie vs. Disanalogie. Eine „tiefe“ Analogie (s.o.) besitzt demnach einen großen „positiven“ Anteil, eine „flache“ Analogie hingegen einen großen „negativen“ Anteil, vgl. Hentschel (2010), S. 38 f.

<sup>289</sup>explorativer Charakter

<sup>290</sup>nachträglich beschreibender Charakter

<sup>291</sup>Vgl. Holyoak / Thagard (1989), S. 296

<sup>292</sup>Vgl. Hentschel (2010), S. 41

<sup>293</sup>Vgl. Funke (2000)

<sup>294</sup>Vgl. Sternberg (1995), S.363f.

verkleinert entsprechende Eigenschaften. Bis ins Mittelalter existierte die Vorstellung, dass mit der Veränderung der geometrischen Abmessungen eines Systems ebenfalls alle seine Eigenschaften entsprechend skaliert würden. Eine Folge davon waren diverse erfolglose Versuche des Menschen, den Vogelflug zu imitieren, vgl. Abbildung 2.32. Zwar wurden die Abmessungen des Flugapparates so gewählt, dass sie das gleiche geometrische Verhältnis zum menschlichen Körper bildeten, wie es die Abmessungen der Vogelflügel zum Vogelkörper besitzen. Die für den Vogelflug bestimmende Eigenschaft – das Verhältnis von Vogelvolumen zu Flügeloberfläche<sup>295</sup> – wurde aber in einem vollkommen anderen Verhältnis skaliert. Ein Stufensprung einer Länge  $L_0 = 1$  mit  $\varphi_l = 10$  führt zu 10-fach größeren Längenabmessungen  $L_1$ <sup>296</sup>, zu 100-fach größerer Oberfläche<sup>297</sup> und zu 1000-fach größerem Volumen<sup>298</sup>. Wenn also beim Vogel das für das Fliegen nötige Verhältnis  $\varphi_{Vogel} = \frac{\text{Oberflächenkr\ddot{a}fte}}{\text{Volumenkr\ddot{a}fte}} = 1$  betrage, ergibt sich demgegenüber beim Menschen ein Verhältnis  $\varphi_{Mensch} = \frac{\text{Oberflächenkr\ddot{a}fte}}{\text{Volumenkr\ddot{a}fte}} = \frac{\varphi_l^2}{\varphi_l^3} = \frac{100}{1000} = \frac{1}{10}$ . Damit ist nachvollziehbar, weshalb der Mensch trotz bzw. wegen geometrisch exakt skalierten Abmessungen eines Flugapparates nicht in der Lage sein kann, den Vogelflug zu imitieren. Die Gewichtskräfte sind in diesem Fall wesentlich „effektiver“ als die Oberflächenkräfte.<sup>299</sup>

Dieses Beispiel illustriert eine wesentliche Eigenschaft der Skalierung: es ist unmöglich, alle Eigenschaften eines Systems exakt mit dem gleichen Skalierungsfaktor zu verändern. Daraus folgt, dass sich das Verhalten<sup>300</sup> eines Systems mit jeder Skalierung in gewissen Grenzen ändert. Ein geometrisch skaliertes System verhält sich in der Summe seiner Eigenschaften deshalb immer anders als das ursprüngliche System. Da die Funktionserfüllung eines Systems aber oft nur von einer oder wenigen Systemeigenschaften oder deren Verhältnissen abhängig ist, ist es in dem Fall möglich, diese Systeme so zu skalieren, dass zwischen den betrachteten Eigenschaften oder Verhältnissen Ähnlichkeit vorliegt.<sup>301</sup>

Basierend auf dieser Erkenntnis formulierte bereits Reynolds sein Ähnlichkeitsgesetz<sup>302</sup>, das es ermöglicht, Strömungen am Original- und am skalierten Modellsystem in Relation zu setzen und damit von einem auf das andere zu schließen. Durch die daraus entwickelte Ähnlichkeitstheorie<sup>303</sup> wurde es z.B. möglich, dem zu entwickelnden Originalsystem nachempfundene, kleinere Modelle des Systems für die Validierung zu nutzen. Damit konnte eine Validierung besonders großer oder teurer Systeme frühzeitig im Entwicklungsprozess überhaupt erst ermöglicht und die Kosten für die Validierung gesenkt werden.

<sup>295</sup>Damit sind wiederum Größen wie das Gewicht, Auftriebskraft, Strömungswiderstand, etc. abhängig, die in ihrem Verhältnis letztlich das Fliegen ermöglichen.

<sup>296</sup> $L_1 = \varphi_l * L_0 = \varphi_l * 1 = \varphi_l$

<sup>297</sup> $A_1 = L_1 * L_1 = (\varphi_l * L_0) * (\varphi_l * L_0) = \varphi_l^2 * L_0^2 = \varphi_l^2$

<sup>298</sup>Analog:  $V_1 = L_1 * L_1 * L_1 = (\varphi_l * L_0) * (\varphi_l * L_0) * (\varphi_l * L_0) = \varphi_l^3 * L_0^3 = \varphi_l^3$

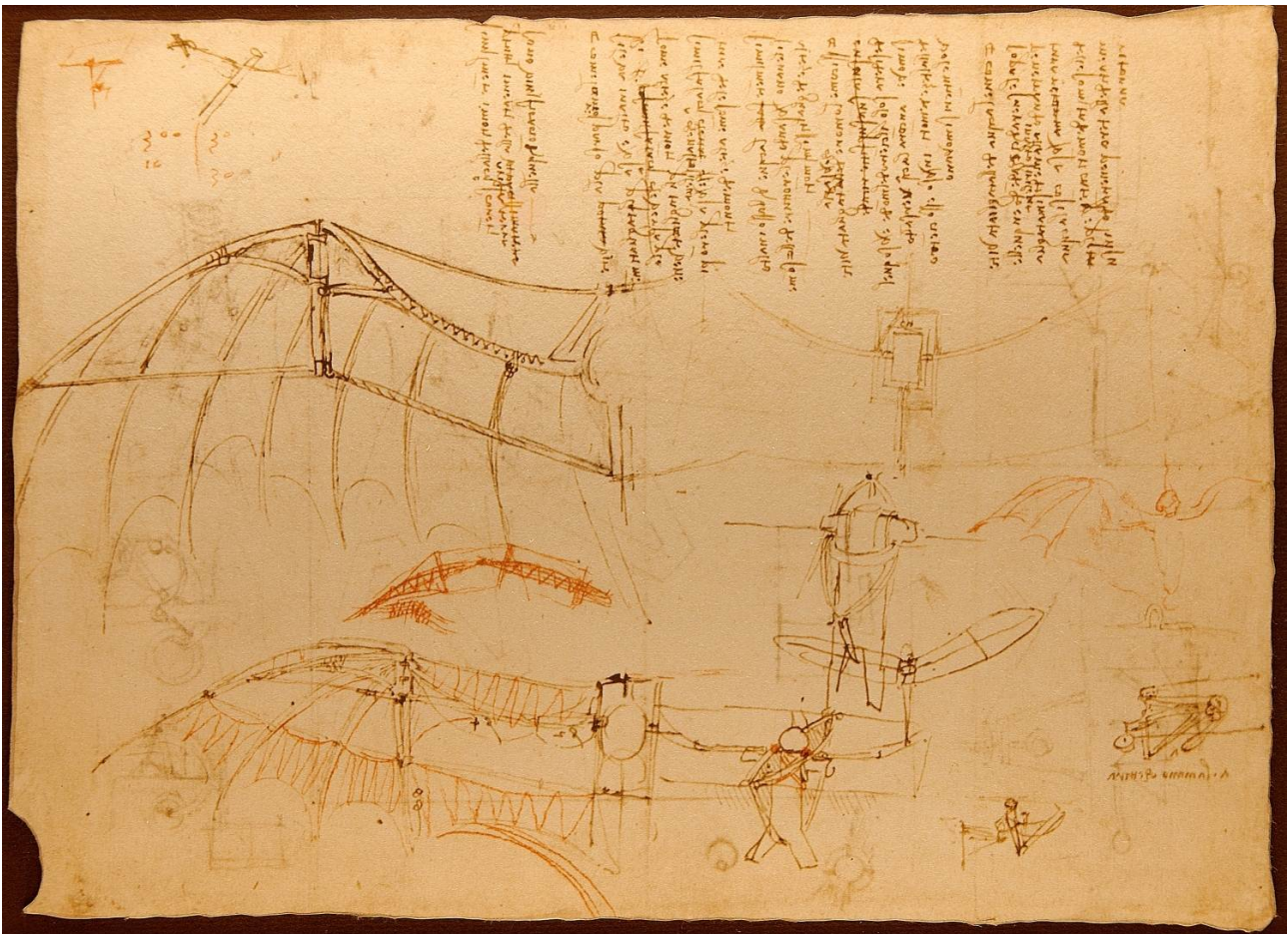
<sup>299</sup>Vgl. zu diesem Beispiel Kasper (2000), S. 9 ff.

<sup>300</sup>Das Verhalten ergibt sich aus der Summe der Eigenschaften des Systems

<sup>301</sup>Dieses macht man sich in der Produktentwicklung z.B. bei Baukasten-, Baureihen- und Plattformentwicklungen zunutze.

<sup>302</sup>Vgl. Reynolds (1927), S.39 ff.

<sup>303</sup>Vgl. z.B. Pawlowski (1971)



**Abbildung 2.32** Flugapparat aus dem Jahre 1488 von Leonardo da Vinci. Abbildung entnommen aus Apolin (2008), S. 115.

Ein weiterer Aspekt der Skalierungsproblematik ergibt sich bei der Übertragung von Erkenntnissen von einem Abstraktionsniveau auf ein anderes. Soll beispielsweise ein Gas beschrieben werden, so können auf Molekülebene einzelne Moleküle dieses Gases sehr genau und differenziert beschrieben werden (Aufbau, Masse, etc.). Bei der Betrachtung einzelner Moleküle ist es aber nicht möglich, die typischen Eigenschaften eines Gases wie Druck und Temperatur zu erfassen oder zu beschreiben. Diese können erst auf dem nächsthöheren Abstraktionsniveau erkannt und beschrieben werden (Verteilung der Stoßhäufigkeit, Geschwindigkeit der Moleküle, etc.).

# 3 Motivation und Zielsetzung

## 3.1 Motivation

*„Mit der Mikrosystemtechnik verlässt der Mensch die ihm gewohnten Dimensionen des 'Begreifbaren' und begibt sich auf ein Gebiet, das nicht mehr seinen natürlichen Sinnesempfindungen entspricht. Er muss lernen, mit diesen neuen Möglichkeiten zu arbeiten, wohl seine Erfahrungen einzubringen, aber der neuen Technologie nicht unbedacht aufzuzwingen. Diese Entwicklung setzte bereits mit der Mikroelektronik ein, nur ist die Elektronik von sich aus schon für den normalen Menschen 'abstrakt', und der Konflikt mit der persönlichen Erfahrung entstand erst bei der Auseinandersetzung mit mechanischen Mikrostrukturen.“*<sup>304</sup>

Ähnliche Zitate, die wie dieses eine Diskrepanz zwischen den gewohnten Denkweisen des Systemkonstruktors einerseits und der Mikrosystemtechnik andererseits andeuten, finden sich auch in weiterer Fachliteratur zur methodischen Entwicklung von Mikrosystemen<sup>305</sup> - oftmals sogar schon auf den ersten Seiten im einleitenden Kapitel. Umso erstaunlicher ist es, dass dieser Aspekt dennoch keine tiefere Beachtung in der Forschung findet. Nach der Einleitung folgt in der Literatur zur (methodischen) Entwicklung von Mikrosystemen oft die Beschreibung der Produktionsverfahren, der Materialien, der Simulations-, Optimierungs- und Validierungsverfahren sowie der Gestaltung von Entwicklungs- und Produktionsprozessen. So sehr diese typische Struktur (und die dahinterstehenden Denkweisen) nachvollziehbar und begründbar sind (z.B. durch die Technologiegetriebenheit der Mikrosystemtechnik, durch die Orientierung an den Prozessen der Mikroelektronik, etc.), so wenig wird dabei der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung berücksichtigt.<sup>306</sup>

---

<sup>304</sup>Menz (1997), S. 1

<sup>305</sup>Vgl. „Mikrosystemtechnik für Ingenieure“ Menz (1997), „Mikrosystementwurf“ Kasper (2000), „MEMS and Microsystems: design, manufacture and nanoscale engineering“ Hsu (2008), „Lehrbuch Mikrosystemtechnik“ Schwesinger et al. (2009), etc.

<sup>306</sup>In die Makrowelt gespiegelt würde es seltsam erscheinen, wenn die Klassiker der methodischen Produktentwicklung – „Konstruktionslehre“ von PAHL und BEITZ Pahl et al. (2005), „Integrierte Produktentwicklung“ von EHRENSPIEL Ehrlenspiel (2007) – nach der Einleitung zunächst umfangreich die wichtigsten Fertigungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Bohren etc. beschrieben.

### 3.1.1 Entwicklungsmethodik in der Mikrosystemtechnik

Entwicklungsmethodische Forschung in der Mikrosystemtechnik adressiert bislang vor allem Probleme bezüglich des Ablaufs der Produktentwicklung, also der Anordnung und Abfolge von Entwicklungsaktivitäten entlang eines Entwicklungsprozesses. Diese Arbeiten erzeugen auf Basis entsprechender Prozessmodelle das für die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik notwendige Modellverständnis bei den Akteuren, vgl. Kapitel 2.6.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung bildet das Wissensmanagement und die Frage, wie vorhandenes fertigungstechnisches Wissen in die Produktentwicklung zurückgeführt und eingebunden werden kann, da fertigungstechnische Restriktionen in der Mikrosystemtechnik in besonderem Maße die Entwicklung beeinflussen und bestimmen. Beispielhaft sollen hier die Erforschung von Design Rules<sup>307</sup> und Design Patterns<sup>308</sup> genannt sein.

Schließlich rückt, getrieben von den Entwurfstechniken der Mikroelektronik, auch der computergestützte, (teil-) automatisierte Systementwurf in den Fokus der Forschung. Ausdruck finden diese Ansätze in folgendem Zitat:

*„Der Ausgangspunkt innovativer Lösungen für Mikrosysteme ist die Analyse und Synthese von Prinzipien und Funktionen mit dem Ziel, neue mikrosystemfähige Funktionsprinzipien zu finden. Dazu sind Simulationsverfahren von großer Bedeutung.“*<sup>309</sup>

Unbestritten sind computergestützte Simulations- und Optimierungsverfahren gerade in der Mikrosystemtechnik besonders hilfreich, um sich ändernde Gewichtungen zu nutzender Effekte zu berücksichtigen. Aus ökonomischer Sicht, vor dem Hintergrund sehr kostenintensiver Fertigungsverfahren, sind sie sogar unbedingt notwendig, um durch die damit mögliche Validierung möglichst früh im Produktentstehungsprozess entsprechendes Wissen zu generieren und Änderungskosten zu vermeiden. Allerdings stellt sich für den Verfasser dieser Arbeit die Frage, ob nicht zunächst trotz aller Computerunterstützung der Mensch den *Einfall* zur Nutzung eines bestimmten Prinzips haben muss, auf dessen Basis dann eine gewünschte Funktionalität in eine geometrisch-stoffliche Gestalt überführt werden kann. Erst nachdem dieser Einfall zu einem bestimmten Funktions-Gestaltzusammenhang vorhanden ist, lassen sich darauf aufbauend Simulationsmodelle erstellen. Die Simulation in der Mikrosystemtechnik ist somit nach Meinung des Verfassers nicht in der Lage, schon den vorhergehenden kreativen Schritt in der Entwicklung zu übernehmen.<sup>310,311</sup>

<sup>307</sup>Vgl. Kimmig et al. (2011); vgl. Dickerhof et al. (2012); vgl. Albers / Marz (2003)

<sup>308</sup>Vgl. Deigendesch (2009)

<sup>309</sup>Menz (1997), S. 392

<sup>310</sup>Im Gegensatz zur automatischen Layoutsynthese mikroelektronischer Schaltungen, die inzwischen aufgrund der Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Elementarbausteine sowie ihrer sehr guten formalen Beschreibbarkeit mittels Architekturen, Entwurfssprachen und formalisierter Restriktionen durch den Computer entwickelt werden können.

<sup>311</sup>Dazu: „Parametric design is generally performed after a basic product concept has been established, when creation of a mathematical model of product performance is possible.“ Krishnan / Ulrich (2001)



### 3.1.2 Entwicklungsmethodische Lücke

Die Art und Weise, wie der Mensch Input aus seiner Umwelt aufnimmt, weiterverarbeitet und schließlich Output erzeugt, mit dem er wiederum Einfluss auf seine Umwelt ausübt, wurde und wird intensiv durch die Kognitionspsychologie erforscht, siehe Kap. 2. Die Entwicklungsmethodik greift diese Erkenntnisse auf und entwickelt – abgestimmt auf die Funktionsweisen, Eigenheiten und Unzulänglichkeiten des menschlichen Geistes – Empfehlungen, Vorgehensweisen, Hilfsmittel, Modellvorstellungen etc. zur Unterstützung des Konstrukteurs.

Grundsätzliche Überlegungen zur gegenseitigen Beeinflussung der für die Produktentwicklung relevanten kognitiven Prozesse und der Größenordnung der zu entwickelnden Produkte fehlen hingegen, obwohl erste Hinweise zum Vorhandensein einer solchen Korrelation immer wieder auftauchen.<sup>312,313</sup>

Die Relevanz der Verknüpfung kognitionspsychologischer Erkenntnisse mit der Mikrosystemtechnik lässt sich mit einem Zitat aus dem Rahmenprogramm des BMBF zur Förderung der Mikrosystemtechnik 2004-2009 entnehmen. Dort heißt es:

*„Es ist davon auszugehen, dass bedeutende Innovationen nicht mehr in den „Kernwissenschaften“ wie Physik oder Chemie stattfinden werden, sondern in den Grenzbereichen, an denen solche Disziplinen wie Biotechnologie, Nanotechnologie, IuKTechnologien [Informations- und Kommunikationstechnologien] und auch Kognitionswissenschaften miteinander verschmelzen.“*<sup>314</sup>

## 3.2 Konkretisierung der Zielsetzung

Ausgehend vom Stand der Forschung sowie der dort beschriebenen eigenen Erfahrungen bei der Konstruktion von Mikrosystemen folgert der Verfasser der vorliegenden Arbeit, dass das Aufstellen von Funktions-Gestaltzusammenhängen als Voraussetzung für die Analyse und Synthese technischer Systeme aufgrund der Art und Weise, wie mentale Modelle gebildet und genutzt werden, in der Mikrosystemtechnik erschwert ist. Dazu werden folgende Hypothesen formuliert:

1. Das Erschließen der Mikrosystemtechnik durch verschiedene Disziplinen resultiert beim Systemkonstrukteur in Einschränkungen beim Aufstellen von Funktions-Gestaltzusammenhängen.

<sup>312</sup>Vgl. das einleitende Zitat dieses Kapitels.

<sup>313</sup>Vgl. dazu Trimmer: *„Things behave substantially differently in the micro domain. Forces related to volume, like weight and inertia, tend to decrease in significance. Forces related to surface area, such as friction and electrostatics, tend to become large. And forces like surface tension that depend upon an edge become enormous. It takes awhile to get one's micro intuition sorted out. – An ant carrying many times its weight or a water bug walking on the surface of a pond are just two manifestations of this different micro world.“*

<sup>314</sup>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 33

2. Die unterschiedlichen, hochkomplexen Technologien in der Mikrosystemtechnik erschweren das Aufstellen von Funktions-Gestaltzusammenhängen durch den Systemkonstrukteur.
3. Die fehlende direkte und umfassende Nutzbarkeit der Sinne beschränkt die Kreativität des Systemkonstruktors in der Mikrosystemtechnik beim Aufstellen neuer Funktions-Gestaltzusammenhänge.

Die Diskussion der Hypothesen führte zum Konzept der „Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik“, mit deren Hilfe es möglich wird, die genannten Probleme im Produktentstehungsprozess einer Mikro-Gasturbine auf Basis der urformenden Mikrosystemtechnik sowie die sich daran anschließende Entwicklung eines Referenzprozessmodells zu begründen, vgl. Abschnitte 2.7.5 und 2.5.4.

In Kenntnis der Konstruktionsbarrieren wird schließlich ein Ansatz zur Überwindung der Konstruktionsbarrieren – ein Funktionskatalog für die Mikrosystemtechnik – diskutiert, aufgegriffen und konkretisiert.

# 4 Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik

Im Folgenden werden die Barrieren hergeleitet, die den Konstrukteur während der Konstruktion eines mikrosystemtechnischen Produkts beeinflussen. Hierbei sollen vor allem Barrieren betrachtet werden, die während der Produktlebenszyklusaktivitäten „Ideenfindung“ sowie „Prinzip- und Gestaltmodellierung“, vgl. Abschnitt 2.6.1, existieren. Die hier unter dem Begriff „Konstruktionsbarrieren“ diskutierten Barrieren sind nicht zu verwechseln oder gleichzusetzen mit den von DÖRNER geprägten Begriffen zur Klassifikation von Problemen.<sup>315</sup>

Die Konstruktionsbarrieren werden erst offenbar, wenn verschiedene Merkmale der mikrosystemtechnischen Produktentwicklung, wie sie in den Grundlagen beschrieben wurden, in Bezug zueinander gesetzt werden. Dazu soll zunächst die Rolle von Analyse und Synthese in der Produktentwicklung beschrieben und der Zusammenhang zur Analogiebildung hergestellt werden.

## 4.1 Analyse und Synthese im PEP

Die Analyse technischer Systeme schafft das grundlegende Verständnis über die Funktionsweise des betrachteten Systems. Hierzu gehört das Verständnis über gewünschte Funktionen genauso wie das Verständnis über ungewünschte Funktionen bzw. Fehlfunktionen. Im Rahmen der Produktentwicklung ist die Systemanalyse immer verbunden mit der Systemsynthese.<sup>316</sup> Damit wird das Ziel verfolgt, gewünschte Funktionen effizienter oder besser zu realisieren oder ungewünschte Funktionen (z.B. Fehlfunktionen) zu eliminieren.

---

<sup>315</sup>Synthese-, Interpolations- und dialektische Barriere - diese klassifizieren ein Problem nach den Dimensionen „Bekanntheitsgrad der Mittel“ und „Klarheit der Zielkriterien“, vgl. Dörner (1979), S.14

<sup>316</sup>„Es besteht dabei bei jedem Handlungszyklus die Möglichkeit, ein vorgegebenes Ziel zu übernehmen und dann die Situation zu analysieren, oder durch eine Situationsanalyse selbst das Ziel zu definieren. Das bewusste oder unbewusste Finden von Lösungen wird als Wechselspiel von Synthese- und Analyseschritten dargestellt. Die hieraus gewonnenen und konkretisierten Lösungsalternativen werden im Anschluss hinsichtlich des formulierten Ziels analysiert und bewertet. Kann eine Entscheidung für eine Alternative getroffen werden, schließt sich die Planung des weiteren Vorgehens an. Erfüllt jedoch keine Alternative die Anforderungen, muss zum Schritt der Situationsanalyse und Zielformulierung zurückgekehrt werden.“ VDI 2206 (2004), S. 26ff.

### 4.1.1 Analyse

Die Analyse eines Produkts dient allgemein zum Aufbau von Systemverständnis. Dieses kann aus unterschiedlichen Gründen benötigt werden (z.B. zur Weiterentwicklung bestehender Produkte, zum Reverse Engineering, in der Lehre, aus Neugier und allgemeinem Interesse, etc.). MATTHIESEN<sup>317</sup> nennt als mögliche Gründe für die Analyse unter anderem die Fehler- und Schwachstellenerkennung, marktgerechte Weiterentwicklung, Produktdokumentation, Kostenermittlung, etc. Eine Produktanalyse ist normalerweise Teil einer umfassenderen Situationsanalyse, die einer Problemlösung vorausgeht. Schon DUNCKER forderte, dass die „[...] 'inständige' Analyse der Situation, im besonderen das Bestreben, geeignete Situationsmomente sinngemäß sub specie des Ziels zu variieren, [...] zum eigentlichen Wesen einer Lösungsentstehung durch Denken gehören [müsse].“<sup>318</sup> Diese Forderung wurde durch ALBERS konsequenterweise in der SPALTEN-Methode umgesetzt, die jeden Problemlösungsprozess mit einer Situationsanalyse beginnt.<sup>319</sup> Generell kann die Analyse dazu dienen, Wissen und Erfahrungen zur Funktionsweise von Systemen zu erlangen, um dieses zukünftig weiter nutzen zu können.<sup>320</sup> Soll das Produkt weiterentwickelt werden, kann die Analyse dazu dienen, Schwachstellen – und damit Optimierungspotential – auf technischer Seite aufzudecken.<sup>321</sup>

### 4.1.2 Synthese

Nachdem Kundenbedürfnisse und -wünsche erkannt sowie die (strategischen) Ziele, Möglichkeiten und Wünsche des Unternehmens in die Forderung nach entsprechenden Funktionen übersetzt wurden<sup>322</sup>, dient die Synthese dazu, die spezifizierten Funktionen in technische Produkte umzusetzen. Werden Produkte abstrahiert als Summe einzelner „Komponenten“, die untereinander in einer bestimmten Art und Weise durch „Relationen“ miteinander verbunden sind, aufgefasst, können nach HENDERSON und CLARK<sup>323</sup> vier Arten der Produktinnovation unterschieden werden. Zusätzlich definiert ALBERS die Produktgenerationsinnovation als weitere Innovationsart, um dem Charakter in der Realität typischerweise viel komplexerer Produktinnovationen gerecht zu werden, vgl. Abschnitt 2.2.2. Die Innovationsarten werden im

<sup>317</sup>Vgl. Matthiesen (2002), S. 104

<sup>318</sup>Duncker (1963), S.24

<sup>319</sup>Vgl. Albers et al. (2002)

<sup>320</sup>So dient die Analyse eines Stirnradgetriebes im Rahmen des Workshops zur „Maschinenkonstruktionslehre (MKL) 1“ des am IPEK entwickelten „Karlsruher Lehrmodells für Produktentwicklung (KaLeP)“, vgl. Albers et al. (2006a), unter anderem dazu, Studenten Wissen und vor allem Erfahrungen zu grundlegenden technischen Zusammenhängen zu vermitteln. Auf dieser Basis synthetisieren die Studenten in den darauf folgenden MKL2- bis MKL4-Workshops eigene technische Systeme, in denen viele Elemente des Stirnradgetriebes in völlig neuem Zusammenhang (z.B. Lager, Welle-Nabe-Verbindungen, etc.) wieder auftauchen.

<sup>321</sup>Ein Spezialfall in diesem Zusammenhang ist das Analysieren eines defekten Produkts mit dem Ziel, die Fehlerursache zu ermitteln.

<sup>322</sup>Dieses wird vor allem in der Lebenszyklusaktivität „Profilmodellierung“ geleistet

<sup>323</sup>Vgl. Abschnitt 2.2

Folgenden beschrieben und am Beispiel der Entwicklung der Funktion „Wandlung chemischer in mechanische Energie“ in entsprechende neue Produkte erläutert. Das Ausgangsprodukt sei eine axiale Gasturbine, die als stationäres Wellentriebwerk ausgeführt ist.

Eine *inkrementelle Innovation* würde nach HENDERSON UND CLARK bei der Realisierung der Funktion „Wandlung chemischer in mechanische Energie“ wie zuvor zu einem stationären Wellentriebwerk gleicher Bauart führen, dessen Wirkungsgrad durch verbesserte Geometrien der Schaufeln und des Diffusors, Verringerung der Spaltabstände zwischen Schaufel-Enden und Gehäuse und veränderte Materialien (leichter, hitzebeständiger) leicht erhöht wurde. Im Gegensatz dazu bezeichnet ALBERS eine solche Innovation als *Produktgenerationsinnovation*, da die Gesamtfunktion zwar mithilfe des gleichen Prinzips realisiert wird (dieses entspräche formal einer inkrementellen Innovation), gleichzeitig aber viele Subfunktionen neu entwickelt wurden und sowohl modulare als auch radikale Innovationen beinhalten können.

In Bezug auf die im Beispiel geforderte „Wandlung chemischer in mechanische Energie“ könnte eine *modulare Innovation* das Ausgangsdesign einer axialen Gasturbine mit Ringbrennkammer zu einer radialen Gasturbine mit Rohrbrennkammern verändern.

Würde im Beispiel die Forderung nach „Wandlung chemischer in mechanische Energie“ zu der Entwicklung einer Brennstoffzelle führen, wäre dieses eine *radikale Innovation*. Weder die bislang eingesetzten Komponenten noch die Verknüpfung der Komponenten innerhalb des Gesamtsystems blieben erhalten.

Übertragen auf das Beispiel könnte eine *architekturelle Innovation* die Entwicklung eines Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerks sein. Hierbei werden schon vorhandene und bekannte Komponenten von Gas- und Dampfturbine neuartig miteinander verschaltet und führen so zu starken Erhöhungen des Wirkungsgrades bei der Wandlung chemischer in mechanische Energie.

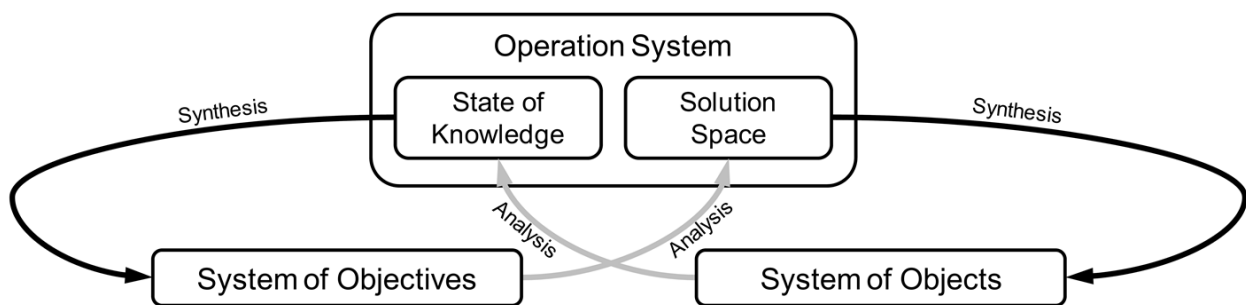
### 4.1.3 Die Korrelation von Analyse und Synthese

Erkenntnistheoretisch ergänzen sich Analyse und Synthese nicht nur, sondern bedingen einander und sind somit die Grundlage jeder Produktentwicklung:

*„Der naturwissenschaftlichen Forschung stehen zwei Verfahren zur Verfügung, die Analyse und die Synthese. Die Analyse geht von einem Ganzen, gesetzlich Zusammengesetzten, Synthetischen aus. Sie zerlegt es und versucht die Einzelteile zu verstehen. Letztes Ziel der Analyse ist aber nicht das Verständnis der Einzelteile. Es stellt sich immer die spezielle Frage nach dem Zusammenwirken der Einzelteile, das heißt nach dem, was das Charakteristikum eines 'Ganzen' ist. Man baut also aus den analysierten Teilen das Ganze wieder mit der erklärten Absicht auf, seine konstitutiven Aufbauprinzipien zu erkennen. Das aber ist eigentlich eine Synthese. In jeder Analyse liegt also bereits ein synthetisches*

*Moment. Das wurde bereits von Leibniz (Zusammenfassung 1960) für die reine mathematische Analysis klar ausgesprochen. Zumindest aber ist eine Synthese nicht denkbar ohne vorhergehende genaue Analyse. Eine noch so genaue analytische Untersuchung wiederum ist für sich betrachtet wertlos, 'hinterlässt einen ungeordneten Trümmerhaufen', wenn nicht eine darauffolgende Synthese die analysierten Einzelfakten wieder zusammensetzt und dadurch zum Verständnis eines Ganzen zu kommen sucht. Das 'Ganze' kann eine komplexere Struktur, ein Gewebe oder ein Organ, aber auch ein Organismus oder ein Ökosystem sein. Analyse und Synthese ergänzen sich also erkenntnistheoretisch zwangsläufig. Sie sind gleichzeitig die handfeste Basis für die Anwendung der Induktion und Deduktion; sie sind die den erkenntnistheoretischen Denkmethode zugrunde liegenden praktischen Verfahren.*<sup>324</sup>

Konkretisiert bedeutet dies für die Entwicklung von Produkten also, dass die Produktentwicklung ebenfalls generell auf der wechselseitigen Analyse und Synthese von Ziel- und Objektsystem basiert. ALBERS ET. AL.<sup>325</sup> visualisieren diesen Zusammenhang in dem „erweiterten ZHO-Modell der Produktentstehung“<sup>326</sup>, vgl. Abbildung 4.1.



**Abbildung 4.1** Erweitertes ZHO-Triple der Produktentwicklung. Abbildung entnommen aus Albers et al. (2012c).

Die Einordnung von Analyse und Synthese in die Produktentwicklung ist in Abbildung 4.2 dargestellt.<sup>327</sup> Während der Erfolg der Analyse einer Gestalt zum Erkennen einer Funktion

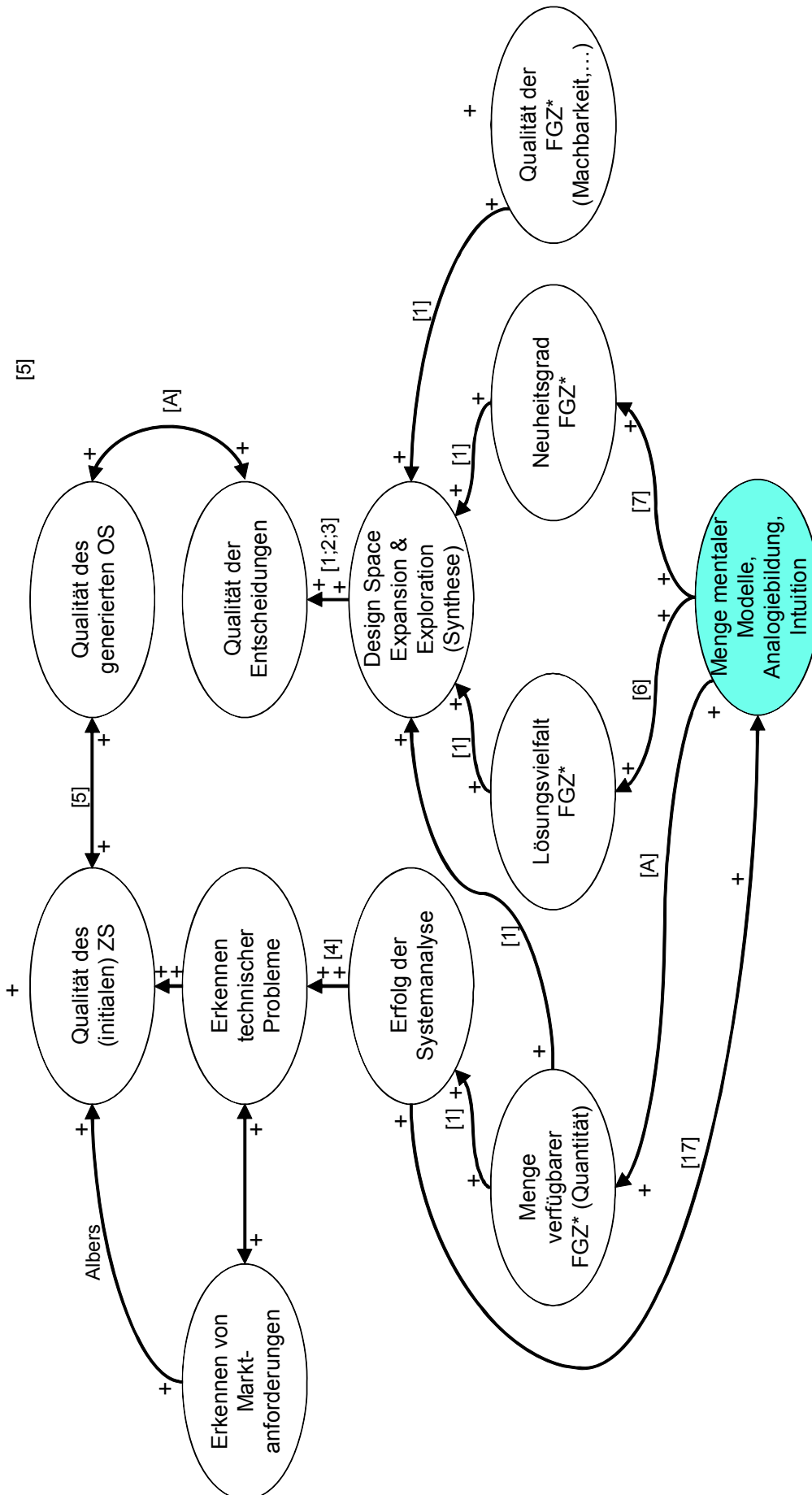
<sup>324</sup>Nachtigall (2010), S. 40

<sup>325</sup>Vgl. Albers et al. (2012c)

<sup>326</sup>ZHO: Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem

<sup>327</sup> Legende zur Abbildung:

[X]: Die Aussage wurde in Referenz X veröffentlicht; [A]: Die Aussage basiert auf einer Annahme; [E]: Die Aussage basiert auf Erfahrungen der Akteure; [O]: Die Aussage basiert auf eigenen Untersuchungen; [?]: Ob eine Verbindung existiert, ist nicht bekannt; [1]: Shah et al. (2003); [2]: Dylla (1991); [3]: Lietz (2009); [4]: VDA 4 (2006); [5]: Albers et al. (2012c); [6]: Landau (1971); [7]: Kalogerakis (2010); [8]: Kasper (2000); [9]: Menz (1997); [10]: Getzels / Jackson (1962); [11]: Nachtigall (1998); [12]: Gardner (1985); [13]: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2010); [14]: Miller (1956); [15]: Peterson / Carson (2000); [16]: Peterson et al. (2002); [17]: Duncker (1963).



**Abbildung 4.2** Analyse und Synthese sind zentraler Bestandteil der Produktentwicklung (FGZ = Funktions-Gestaltzusammenhang). Die Legende zur Abbildung befindet sich in der Fußnote auf Seite 82.

abhängig ist von der Menge und der Qualität der Funktions-Gestaltzusammenhänge (FGZ)<sup>328</sup>, kann der Erfolg der Synthese über die Aufweitung des sog. Entwurfsraums („Design Space Expansion“) und dessen Erschließung („Design Space Exploration“) abgeschätzt werden.<sup>329</sup> Diese Aufweitung und Erschließung des Entwurfsraums lassen sich abschätzen über die Merkmale Qualität, die Menge, die Vielfalt sowie den Neuheitsgrad der generierten Funktions-Gestaltzusammenhänge. Erst auf Basis eines Entwurfsraums, der gute Lösungsalternativen bietet, können prinzipiell auch gute Entscheidungen und damit gute Objektsysteme entstehen. Da das Objektsystem aber immer an einem Zielsystem ausgerichtet ist (bzw. sein sollte), ist die Qualität des Objektsystems nur so gut wie die Qualität des Zielsystems, dessen Qualität wiederum durch die Abbildung von marktbezogenen und technischen Anforderungen unter konsequenter Berücksichtigung und Erfüllung des Anbieternutzens (z.B. Produzierbarkeit) bestimmt ist. Die technischen Anforderungen ergeben sich dabei häufig aus der Systemanalyse.

Die Analogiebildung ist das zentrale Element in der kreativen Kognition (vgl. 2.9.2). Durch sie entsteht die Erkenntnis und der „Aha-Effekt“ beim Betrachten einer zuvor subjektiv ungelösten Fragestellung.<sup>330</sup> Auf die Tätigkeiten in der Produktentwicklung projiziert nimmt die Analogiebildung zwei Schlüsselstellungen ein. Dieser kognitive Mechanismus ist einerseits der Schlüssel zur kreativen *Synthese* von Systemen, andererseits ist er ebenso wichtig für deren *Analyse*. Wie Analogiebildung, Analyse und Synthese genau zusammenhängen, soll in den folgenden Abschnitten diskutiert werden.

#### 4.1.4 Analogiebildung in der Analyse

Die Analyse eines bislang unbekanntes Systems mit dem Ziel, einen Funktions-Gestaltzusammenhang zu erkennen, nutzt den Vergleich des unbekanntes Systems oder seiner Elemente mit bereits bekannten Funktions-Gestaltzusammenhängen bekannter Systeme. Das Bindeglied zwischen den während der Analyse gewonnenen Einblicken in das System und dem Verständnis über dessen Funktionsweisen stellt die Analogiebildung dar. Durch Vergleich der gewonnenen Einblicke mit schon bekannten Funktionsweisen ähnlicher Systeme kann dieses Wissen auf das zu analysierende System übertragen werden und somit zu seiner Erklärung und Beschreibung beitragen. Dadurch können in der Analyse Rückschlüsse auf die Funktionsweise des unbekanntes Systems gezogen werden. Dieses Vergleichen bedingt auch hier die möglichst ganzheitliche Empfindung von bekanntem und unbekanntem System unter Einbeziehung möglichst vieler Sinneseindrücke.

<sup>328</sup>Die Funktion beschreibt den einem Objekt zugeordneten Sinn und Zweck, die Gestalt eines technischen Objekts beinhaltet Informationen über seine geometrische Form, seine materielle Beschaffenheit sowie der räumlichen Anordnung. Ein Funktions-Gestaltzusammenhang beschreibt somit, *was* ein Objekt machen soll und *wie* es dieses macht.

<sup>329</sup>Vgl. Shah et al. (2003)

<sup>330</sup>Vgl. Smith et al. (2011)



### 4.1.5 Analogiebildung in der Synthese

Bei der Synthese technischer Systeme werden gewünschte technische Funktionen in eine konkret gestaltete körperlich-stoffliche Ausprägung überführt. Dabei kann die Definition einer gewünschten Hauptfunktion aufgrund des noch hohen Abstraktionsniveaus zwar noch ohne zwingenden Bezug zur Gestalt durchgeführt werden. Dieses ist Inhalt der Profilmodellierung, in der die erkannten Kundenwünsche und der immer auch zu berücksichtigende Anbieternutzen zur Formulierung einer Hauptfunktion dienen.

Die Definition der für die Hauptfunktionserfüllung benötigten Sub-Funktionen kann aber im Maschinenbau nicht mehr gestaltungsfrei durchgeführt werden. Das bedeutet, dass der Entwickler die Definition spezifischer Sub-Funktionen und ihrer relationalen Anordnung nicht durchführen kann, ohne dabei schon konkrete, gestaltbehaftete Lösungen im Sinn zu haben. Diese Auffassung entspricht der praktischen Erfahrung, die am IPEK in vielen Produktentwicklungsprojekten gesammelt wurde, steht aber im Widerspruch zur oft vertretenen Ansicht (vgl. Abschnitt 2.6), dass in der Synthese neuer maschinenbaulicher Produkte zunächst deren Funktionsstruktur erarbeitet werden muss, um daraufhin die dann hervortretenden Einzelfunktionen gestalterisch zu entwickeln. Diese neue Auffassung zur Untrennbarkeit der Aktivitäten Funktionsprinzipmodellierung und Gestaltmodellierung in der Synthese wird in Forschung und Entwicklung aktuell maßgeblich durch ALBERS geprägt und führte schließlich zu ihrer Rekombination und gekoppelten Betrachtung in der Aktivität „Prinzip- und Gestaltmodellierung“ des iPeM.<sup>331</sup>

Bei der Konstruktion von Systemen unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Funktion und Gestalt wie oben beschrieben spielt wiederum die Analogiebildung eine zentrale Rolle. Dadurch können schon vorhandene Funktions-Gestaltzusammenhänge einerseits wiederverwendet, andererseits neu entdeckt werden. Durch die Wiederverwendung wird die Produktentwicklung prinzipiell effizient gegenüber einer Vorgehensweise, in der jedes zu entwickelnde Produkt von Grund auf neu entwickelt wird.<sup>332</sup> Dieses schafft die Voraussetzung dafür, sich auf die wesentlichen, Erfolg versprechenden Aspekte in einer Produktentwicklung zu fokussieren und die Ressourcen zielgerichtet einzusetzen. Insbesondere die in Abschnitt 4.1.2 diskutierten modularen sowie architekturellen Innovationen werden durch diese Vorgehensweise gestützt. Diese Innovationsarten bieten im Vergleich zu inkrementellen oder radikalen Innovationen ein ausgewogeneres Verhältnis von Marktpotential zu Marktrisiko bzw. von Realisierungsaufwand zu Marktrisiko. Aus diesem Grunde spricht ALBERS stattdessen von *Produktgenerationsinnovation*, da dieser Ausdruck in den meisten Fällen die Unternehmensrealität widerspiegelt. Ausschließlich inkrementelle oder radikale Innovationen zu forcieren, würde für die meisten Unternehmen aus den oben genannten Gründen – zu geringer Innovationsgrad oder zu hohes Risiko der Produkte – das wirtschaftliche Ende

<sup>331</sup> Vgl. Albers / Meboldt (2007); vgl. Albers (2010)

<sup>332</sup> Vgl. das Neuerfinden des Rades; in diesem Sinne vgl. auch Funke (2000)

bedeuten. Die Suche nach *kurzreichweitigen* Analogien deckt eher schnell umsetzbare, bereits vorhandene Teillösungen auf, während *langreichweitige* Analogien eher zu neuartigen, „innovativen“ Lösungen führen, vgl. Abschnitt 2.9.3.

## 4.2 Die Technologiebarriere

In Kap. 2.6 wurde bereits gezeigt, dass zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen in der Mikrosystemtechnik in Abhängigkeit von der genutzten Produktionstechnologie unterschiedliche PEP-Modelle entwickelt wurden. Diese zum Teil stark unterschiedlichen Prozessmodelle können daher als *Symptom bzw. Wirkung* der Inkompatibilität unterschiedlicher Produktionstechnologien aufgefasst werden. Gleichzeitig verfestigen sie aber durch ihre Anwendung das technologiefokussierte Denken in der mikrotechnischen Produktentwicklung. Somit sind Mikro-PEP-Modelle nicht nur Wirkung, sondern gewissermaßen auch *Ursache* für die Technologiefokussiertheit in der Mikrosystemtechnik.

### 4.2.1 Die Marktstruktur in der Mikrosystemtechnik

Um zu klären, was mit der „Technologiebarriere“ gemeint ist, soll zunächst ein Bild der Marktstruktur in Bezug auf die Anbieter gezeichnet werden. Der Hightechstrategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ist dazu folgendes Zitat zu entnehmen:

*„Der Mikrosystemtechnik-Markt zeichnet sich durch einen besonders großen Anteil hoch spezialisierter Mittelständler aus, die kundenspezifische Lösungen anbieten.“<sup>333</sup>*

Zur Größe der Unternehmen der Mikrosystemtechnik ergibt sich unter Beachtung der IVAM-Studie von 2011 ein differenzierteres Bild.<sup>334</sup> Diese Studie gibt den Anteil an Unternehmen mit weniger als zehn Personen mit 39% an. Damit gehört der Großteil der Unternehmen zur Gruppe der Kleinstunternehmen, wenn nur die Mitarbeiterzahl zugrunde gelegt wird.<sup>335</sup> Dieses führt in Unternehmen der Mikrosystemtechnik zu erheblichen Herausforderungen, „[...] da sie meistens auf sehr schnelllebigen Märkten tätig sind [und] bei Innovationen ein hohes Tempo vorlegen [müssen]“.<sup>336</sup> Hierzu benötigen sie ein sehr breites Know-how und den Zugang zu entsprechenden Kompetenzen<sup>337</sup> und Produktionstechnologien. Damit lässt sich die vom BMBF erkannte hohe Spezialisierung dieser Kleinstunternehmen erklären. Für sie ist es schlicht nicht möglich, auf der Klaviatur aller möglichen mikrotechnischen, sich

<sup>333</sup>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2010)

<sup>334</sup>Vgl. IVAM (2011)

<sup>335</sup>Vgl. Europäische Union (2003), S. 14 ff.

<sup>336</sup>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 18

<sup>337</sup>Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 18

schnell weiterentwickelnden Produktionstechnologien zu spielen: Mikrotechnische Produktionstechnologien<sup>338</sup> (z.B. Siliziumwafer-Handling und -bearbeitung, Synchrotron-Belichtung, Rasterelektronenmikroskopie, etc.) und die benötigten Zusatzausstattungen (z.B. Reinsträume) sind typischerweise sehr komplex und kapitalintensiv und können innerhalb der Kleinstunternehmen der Mikrosystemtechnik nicht bereitgestellt werden. Deshalb wurden weltweit Mikrosystemtechnik-Cluster<sup>339</sup> gebildet, durch die Kleinstunternehmen Zugriff auf ansonsten nicht nutzbare Produktionstechnologien erhalten<sup>340</sup>.

Dies führt dazu, dass Produktentstehungsprozesse in der Mikrosystemtechnik typischerweise in einen Produktentwicklungs- und in einen Produktionsprozess aufgeteilt werden müssen, die organisatorisch und räumlich verteilt umgesetzt werden. So kann die Produktentwicklung in Kleinstunternehmen durchgeführt werden, während die Produktion in Mikrosystemtechnik-Clustern geschieht. Daher müssen sich Kleinstunternehmen notwendigerweise auf lediglich eine oder wenige Technologien zur Realisierung ihrer Mikrosysteme spezialisieren, um trotz hoher technologischer Komplexität qualitativ hochwertige Mikrosysteme entwickeln zu können.<sup>341</sup>

Was aus betriebswirtschaftlicher Sicht eine Notwendigkeit darstellt, erschwert oder verhindert sogar die Realisierung integrierter Produktentstehung in der Mikrosystemtechnik. Diese umfasst nach EHRENSPIEL<sup>342</sup> die organisatorische, informatorische und persönliche Integration, die gerade in der komplexen und sich schnell weiterentwickelnden Mikrosystemtechnik in besonderem Maße nützlich wäre. Ein Ansatz zur organisatorischen Umsetzung integrierter Produktentstehung in der Mikrosystemtechnik – die Organisation des PEP mittels des Core-Team-Management – wird in Abschnitt 7.2 vorgestellt.

Dadurch unterscheiden sich Produktentstehungsprozesse in der Mikrosystemtechnik grundlegend von Produktentstehungsprozessen der Makrowelt, da ein Mikrosystem heutzutage oftmals mittels einer einzigen Produktionstechnologie hergestellt wird. Die für die Planung, Überwachung und Koordination dieser Mikro-PEP benötigten PEP-Modelle sind ebenfalls auf eine spezielle Fertigungstechnologie fokussiert. Die Freiheit in der Gestaltung von Mikrosystemen wird hierdurch stark eingeschränkt, da die Herstellbarkeit unter Beachtung der Restriktionen aus der bereits festgelegten Produktionstechnologie zu gewährleisten ist. Die Qualität der Funktionserfüllung ist damit übermäßig starken Kompromissen unterworfen. Die Entwicklung erfolgt insbesondere technologiespezifisch anstatt -übergreifend.

<sup>338</sup>Der Begriff Produktionstechnologie umfasst dabei sowohl Fertigungs- wie auch Qualitätssicherungsverfahren

<sup>339</sup>Beispiele hierfür sind Karlsruhe, Dortmund, Twente

<sup>340</sup>Die Motivation der „large scale infrastructure EUMINAfab“ der Europäischen Union bestätigt diese Aussage: *Innovative ideas based on solutions using micro and nano fabrication technologies require access not only to high end equipment but also the essential highly skilled personnel. It is not possible for SMEs [small or medium-sized enterprise] or even most research departments to justify investment in a comprehensive range of technologies and trained personnel, especially when the need is to try out the feasibility of a new idea or develop a one off tool.*

<sup>341</sup>Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 18

<sup>342</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2007), S. 199 ff.

Dieses führt dazu, dass die in einem Mikrosystem zu realisierenden Funktionen durch den Konstrukteur gestalterisch so umgesetzt werden, dass sie durch die bereits festgelegte Produktionstechnologie realisiert werden können. Der Konstrukteur ist also stark produktionstechnologiegetrieben und der Leitsatz „form follows function“ besitzt keine übergeordnete Bedeutung.<sup>343</sup> Dieses führt dazu, dass die Funktionserfüllung oft nicht optimal ist. Dieses lässt sich am Beispiel der Funktion *Erzeugung einer Induktivität*, die mittels Mikrospulen realisiert wird, anschaulich darstellen.

#### 4.2.2 Beispiel: Entwicklung einer Mikroinduktivität

Der klassische und effektive Aufbau einer Spule basiert auf einem ferromagnetischen Kern, der möglichst mehrlagig mit einem elektrischen Leiter umwickelt wird. Die einzelnen Windungen des Leiters sollen dabei möglichst eng gewickelt aneinander liegen, gleichzeitig aber elektrisch voneinander isoliert sein, vgl. Abbildung 4.3, oben.<sup>344</sup>

Eine wesentliche Restriktion ist es, die dreidimensionale Spulengeometrie<sup>345</sup> mit einer zweieinhalb-dimensionalen Technik<sup>346</sup> zu realisieren. Dieses führt dazu, dass der Leiterquerschnitt selbst rechteckig statt rund, die Spulenwindungen ebenfalls nicht rund sondern rechteckig, die Windungen aufgrund fehlender Isolationsschichten nicht optimal dicht aneinander liegen und der Aufwand zur Definition der Belichtungsmasken und Prozessschritte zur Herstellung relativ hoch sind. Mehrlagige Mikrospulen erhöhen die Komplexität der Maskenherstellung und die Anzahl benötigter Prozessschritte um ein Vielfaches und wurden in der Recherche des Verfassers gar nicht gefunden. Weiterhin ist in der Gestaltung die Möglichkeit der Materialwahl stark limitiert. Im abgebildeten Beispiel der in Siliziumtechnik hergestellten Mikrospule wurde daher auf den ferromagnetischen Eisenkern völlig verzichtet.

<sup>343</sup>Vgl. dazu Marz (2005), S. 146:

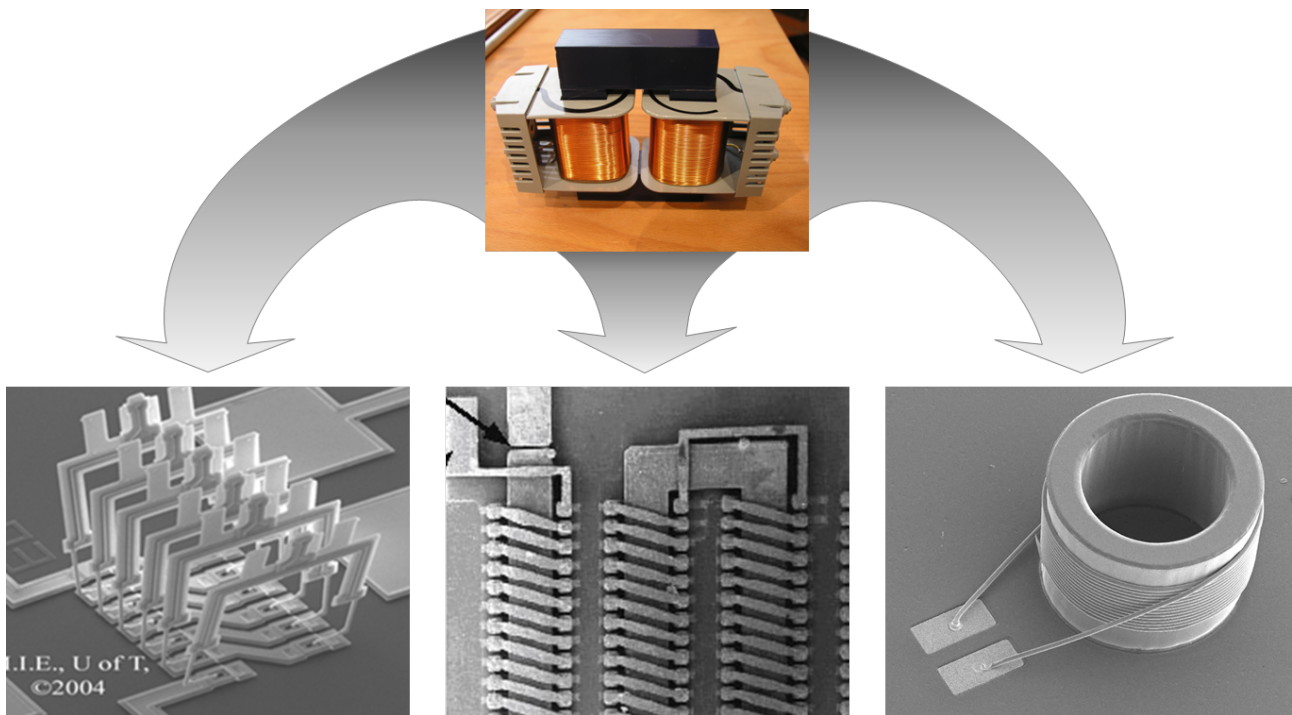
*„Als Fazit lässt sich festhalten, dass das Vorgehen in der Produktentwicklung makroskopischer Systeme funktionsorientiert und anforderungsgetrieben ist. Im klassischen Maschinenbau wurden sehr viele Methoden und Werkzeuge im Hinblick auf die frühen Phasen der Produktentwicklung entwickelt, um feststellen zu können, welche Elemente in den Anforderungen Funktionen ergeben und mit welchen Effekten und Wirkprinzipien sich diese realisieren lassen. D.h. **Produktmerkmale werden aus Anforderungsmerkmalen festgelegt.***

*Das Vorgehen im mikrotechnischen Entwurf ist technologiegetrieben. Das Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (Z-H-O-System) der Produktionstechnik wie auch die Werkstoff- und Effektentwicklung verlaufen nicht nur parallelisiert zum Z-H-O System der Produktentwicklung, sondern üben eine deutliche Querbeeinflussung auf die Entwurfsphasen aus. D.h. **Produktmerkmale werden aus Technologiemarkmalen (Produktionstechnik, Werkstoffe, Effekte) festgelegt.**“*

<sup>344</sup>Abbildung übernommen aus Schwenker (1806).

<sup>345</sup>„Schraubenlinie“ der Leiterwicklung um den ferromagnetischen Kern

<sup>346</sup>Als zweieinhalb-dimensional werden Techniken bezeichnet, die in zwei Raumrichtungen beliebige Geometrien zulassen, die dritte Raumrichtung aber lediglich durch translatorisches Verschieben der zuvor in den anderen beiden Raumrichtungen definierten zweidimensionalen Geometrie erzeugt wird. Somit entsteht zwar ein dreidimensionaler Körper, eine der drei Raumrichtungen ist aber nur in ihrer Tiefe beeinflussbar und abhängig von den anderen beiden Raumrichtungen



**Abbildung 4.3** Fokussierung und Spezialisierung von Konstrukteuren auf bestimmte Produktionstechnologien können zur Technologiebarriere führen und vorteilhafte Realisierungsmöglichkeiten ausblenden (Quellenangaben zum Bildnachweis im Text).

Die Überordnung des produktionsgerechten Designs gegenüber eines funktionsgerechten Designs („form follows function“) wird hierbei besonders deutlich, vgl. Abbildung 4.3, links<sup>347</sup> und Mitte<sup>348</sup>.

Durch bewusstes Suchen nach Lösungen, die mithilfe anderer Fertigungstechnologien realisierbar sind, kann der Lösungsraum erweitert und die Qualität der Funktionserfüllung gesteigert werden. So konnte durch aktuelle Forschungsarbeiten an Mikrospulen die Qualität der Funktionserfüllung vervielfacht werden, indem durch Kombination bereits bekannter Fertigungsverfahren das aus funktionaler Sicht optimale Design einer Mikrospule (s.o.) auch im Mikrobereich realisiert werden konnte<sup>349</sup>, vgl. Abbildung 4.3, rechts<sup>350</sup>.

Hier zeigen sich die Vorteile der Überordnung eines funktionsgerechten Designs. Die Produzierbarkeit des Designs muss natürlich auch hier gewährleistet bleiben. Durch die erhöhte Qualität der Funktionserfüllung werden völlig neue Einsatzmöglichkeiten im Bereich Energy Harvesting, Auflösungsqualität von Computertomographen, etc. erwartet.

<sup>347</sup>Abbildung übernommen aus Dechev et al. (2004).

<sup>348</sup>Abbildung übernommen aus Park / Allen.

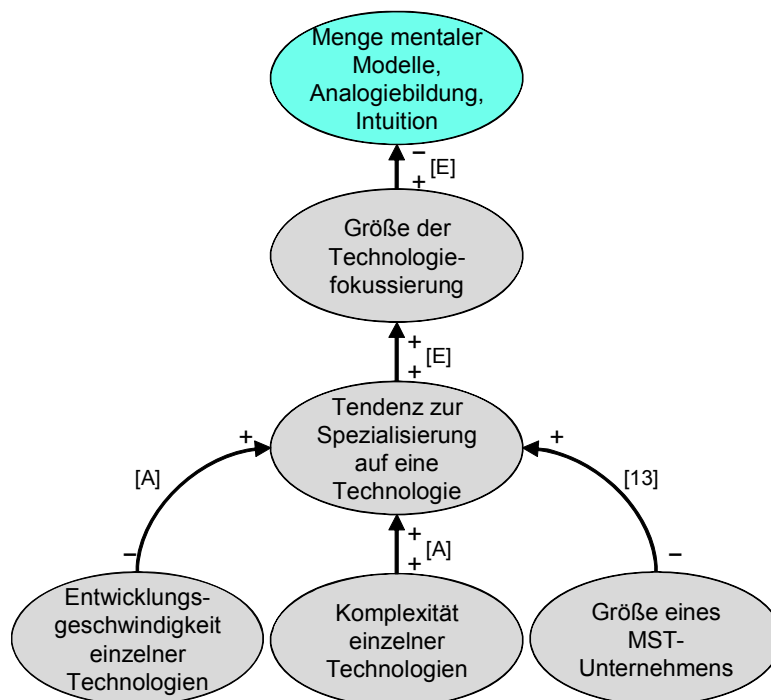
<sup>349</sup>Vgl. Kratt (2010): Zur Realisierung von Mikrospulen wird die LIGA-Technik genutzt, um ferromagnetische Eisenkerne in Mikrodimensionen auf ein Grundsubstrat aufwachsen zu lassen, die dann mithilfe des Wire-Bonding mit einem Leiter mehrlagig umwickelt werden.

<sup>350</sup>Abbildung übernommen aus Kratt (2010), S. 30.

### 4.2.3 Zwischenfazit

Die Technologiebarriere beschreibt die Einschränkung der Kreativität und Gestaltungsfreiheit des Konstrukteurs durch die Spezialisierung auf eine oder wenige Produktionstechnologien. Zwar ist grundlegendes Fachwissen die Voraussetzung, um kreative Ideen auf einem Gebiet zu erzeugen. Gleichzeitig kann aber insbesondere dieses Fachwissen auch „zu Blindheit gegenüber neuen Ideen [...]“<sup>351</sup> und damit zur Hemmung der Kreativität führen.

Die Zusammenhänge der Technologiebarriere sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Die Geschwindigkeit, mit der sich eine Technologie weiterentwickelt, die Grundkomplexität einer Technologie sowie die Größe eines Unternehmens der Mikrosystemtechnik beeinflussen die Tendenz zur Spezialisierung eines Systemkonstrukteurs auf eine oder wenige Technologien. Typischerweise bedeutet eine erhöhte Tendenz zur Spezialisierung im Umkehrschluss eine verstärkte Technologiefokussierung des Systemkonstrukteurs, wodurch für spezielle Technologien zwar sehr umfangreiche und detaillierte mentale Modelle vorliegen, eben solche zur Beschreibung und zum Verständnis anderer Technologien aber nicht gebildet werden. Damit werden die Möglichkeiten zur technologieübergreifenden Analogiebildung ebenfalls beeinflusst.



**Abbildung 4.4** Zusammenhang verschiedener Aspekte der Technologiebarriere, die die kognitiven Strukturen und Prozesse des Systemkonstrukteurs beeinflussen. Die Legende zur Abbildung befindet sich in der Fußnote auf Seite 82.

<sup>351</sup> Funke (2000), S. 294

## 4.3 Die Disziplinbarriere

Durch die Nutzung des „Disziplin“-Begriffs wird die Wissenschaft in unterschiedliche Teilbereiche gegliedert. Eine (Fach-) Disziplin kann dabei mit dem Begriff „Einzelwissenschaft“ übersetzt werden. Im Folgenden soll untersucht werden, wie kreative Prozesse in der mikrosystemtechnischen Produktentwicklung durch die Prägung des Konstrukteurs auf eine Disziplin, insbesondere in Bezug auf typische Denk- und Vorgehensweisen, beeinflusst werden. Aufgrund der starken Prägung der Mikrosystemtechnik sowohl durch die Mikroelektronik als auch durch den Maschinenbau soll die Disziplinbarriere anhand dieser beiden Beispiele exemplarisch diskutiert werden, wohlwissend, dass viele weitere Disziplinen wie Bio- und Nanotechnologie, Physik, Chemie, etc. ebenfalls großen Einfluss auf die Mikrosystemtechnik ausüben.<sup>352</sup>

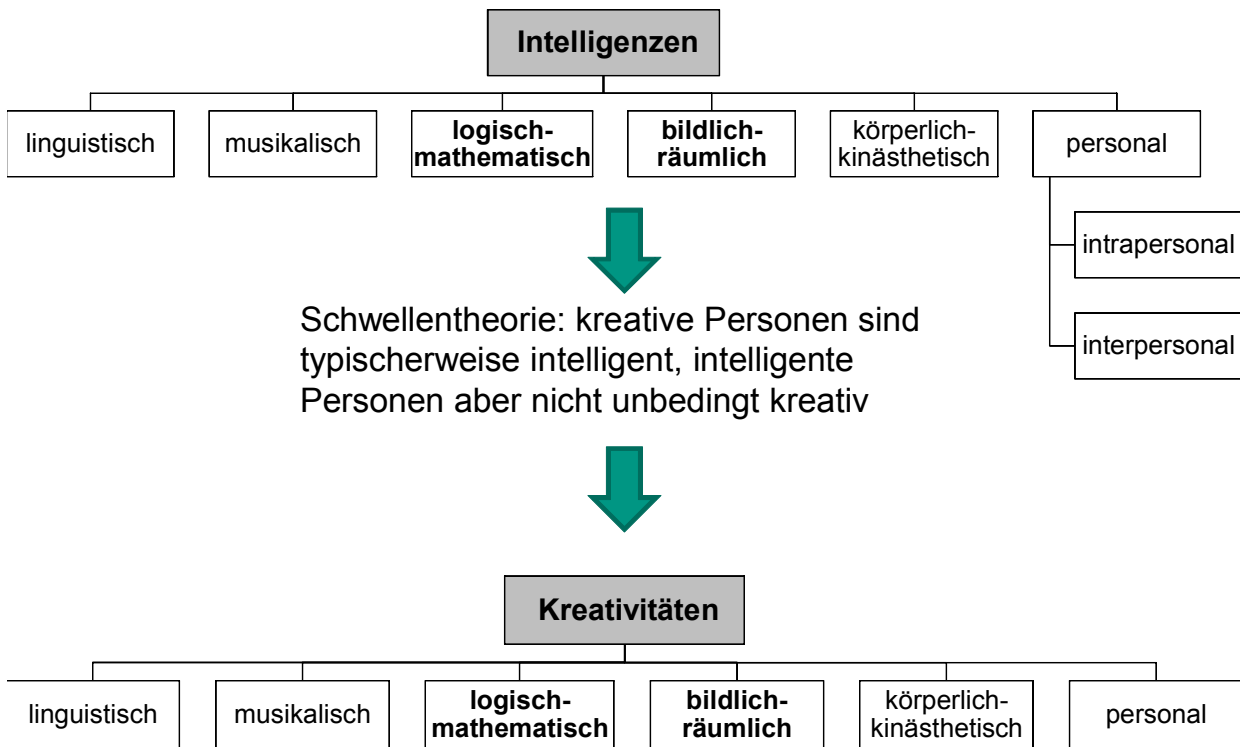
### 4.3.1 Multiple Kreativität

In Abschnitt 2.9 wurde der gegenwärtige Stand der Forschung zur Korrelation von Intelligenz und Kreativität dargestellt. Weiterhin wurde ein Überblick über unterschiedliche Intelligenzmodelle gegeben. GARDNER fasst dabei Intelligenz nicht als einen generellen Faktor auf, sondern unterscheidet mehrere, sog. multiple Intelligenzen.<sup>353</sup> Aufgrund der vorhandenen Korrelation zwischen Intelligenz und Kreativität müsste damit konsequenterweise in Erweiterung GARDNERS Theorie ebenso eine „multiple Kreativität“ folgen. Das bedeutet, dass Kreativität nicht ein universeller Charakterzug ist, sondern dass eine Person in verschiedenen Teilbereichen<sup>354</sup> verschiedene kreative Leistungsfähigkeiten besitzt, vgl. Abbildung 4.5. Diese Auffassung GARDNERS deckt sich mit den Erfahrungen des Verfassers und wird daher im Folgenden weiter vertreten.

<sup>352</sup>Vgl. auch Watty (2006), S.29f: „Die Vielfalt und der hohe Integrationsgrad der Komponenten erfordern interdisziplinäre Zusammenarbeit von erfahrenen Spezialisten verschiedener Wissensgebiete. Das Maß an Interdisziplinarität unterschiedlicher Fachbereiche nimmt in Anwendungsfeldern wie z. B. der Biotechnologie, die Fachwissen aus unterschiedlichen Bereichen vereinen, ständig zu. So werden etwa mechanische und elektrische Komponenten auf engstem Raum verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig auf bisher wenig erforschte Art und Weise. In interdisziplinären Projekten werden oft Experten aus vier bis fünf verschiedenen Fachrichtungen [Glaser94, S. 7; Klaubert98, S. 15] benötigt. Ein hoher Anteil der Entwickler kommt von der Ausbildung her aus der Elektrotechnik, der Physik oder dem Maschinenbau, ergänzt durch Spezialisten aus einer Reihe von anderen Gebieten. Charakteristisch ist aber auch, dass bis zu 2/3 der Entwickler nicht mehr in ihrem ursprünglichen Bereich tätig sind [Klaubert98, S. 13]. Da in diesen Bereichen die Vorgehensweise in Forschung und Entwicklung stark unterschiedlich ist, ist die Zusammenarbeit bis heute nicht optimal. Gerade optimale Abstimmung bei der Zusammenarbeit und effektives Wissensmanagement sind aber künftige Schlüsselkompetenzen des Wirtschaftszweiges Mikrosystemtechnik [SMM03, S. 35].“ Watty fokussiert danach allerdings auf die Systemintegration und Anforderungen an sie. Was das o.g. für die kreativen Momente bedeutet, wird nicht weiter untersucht!

<sup>353</sup>vgl. Abschnitt 2.9.1

<sup>354</sup>Vgl. die Teilbereiche der Intelligenz: linguistische, musikalische, logisch-mathematische, räumliche, körperlich-kinästhetische sowie personale Intelligenzen (intra- und interpersonal), vgl. Abschnitt 2.9.1



**Abbildung 4.5** Zum Zusammenhang von multipler Intelligenz und daraus folgender multipler Kreativität. Eigene Darstellung in Anlehnung an Gardner (1985) und Getzels / Jackson (1962).

### 4.3.2 Einheitliche Beschreibung disziplinspezifischer PEP

Um einen Zusammenhang zwischen den Ausprägungen der postulierten multiplen Kreativitäten und den disziplinspezifischen Produktentwicklungsprozessen zu erkennen, muss diese Diskussion auf einem gemeinsamen, disziplinübergreifenden Modell zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen basieren. Das iPeM<sup>355</sup> ist ein solches Metamodell, das auf Basis der Systemtheorie die Grundelemente zur Beschreibung Produktentstehungsprozesse zur Verfügung stellt und Regeln zu ihrer Nutzung beinhaltet. Werden Produktentstehungsprozesse mithilfe des iPeM beschrieben, so lassen sich diese Prozesse als Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem mittels eines Handlungssystems auffassen. Zur Verringerung der Komplexität von Produktentstehungsprozessen können diese durch die Elemente des iPeM weiter unterteilt werden.<sup>356</sup> Hierzu dienen einerseits die Lebenszyklusaktivitäten, die genutzt werden können, um den Produktentstehungsprozess durch projektspezifische Anordnung dieser Aktivitäten im dynamischen Teil des iPeM vorzustrukturieren, vgl. Abschnitt 2.6.1. Im iPeM wird jede Lebenszyklusaktivität wiederum als Problemlösungsprozess aufgefasst, der immer auf die gleiche Art und Weise beschrieben und durchlaufen werden kann.<sup>357</sup> Damit können die Lebenszyklusaktivitäten ihrerseits weiter unterteilt und strukturiert und

<sup>355</sup>Integriertes Produktentstehungs-Modell, vgl. Abschnitt 2.6.1

<sup>356</sup>Vgl. das Prinzip „Divide et impera“ (dt. teile und herrsche) in Anlehnung an Machiavelli (1986)

<sup>357</sup>vgl. Problemlösungsmethodik „SPALTEN“ in Albers (2010)



somit die Komplexität des gesamten Produktentstehungsprozesses weiter verringert werden. Die Möglichkeit zur Beschreibung jeglicher Produktentstehungsprozesse wird durch diese Grundelemente (dem Prozessbaukasten für die Produktentstehung) ermöglicht.

### 4.3.3 Zur Korrelation multipler Kreativität und Disziplin

Kreativität vor dem Hintergrund unterschiedlicher Disziplinen zu betrachten und zu diskutieren wird durch die Auffassung GARDNERS in Bezug auf die Kreativität gestützt:

*„Wenn auf der Persönlichkeitsebene genausoviele Gemeinsamkeiten wie Unterschiede sichtbar wurden, stellt in allen Fällen die Domäne die problematische Zone mit den größten Abweichungen dar. Aus Jugendlichen, die sich für diesen oder jenen Aspekt ihrer Umwelt interessieren, werden junge Erwachsene, die begabt (oder bestimmt) sind, in einem kulturell relevanten Bereich oder Fach zu arbeiten. Jeder wird jahrzehntelang auf diesem Gebiet tätig sein, und damit kommt der Natur dieses Gebiets entscheidende Bedeutung zu.“<sup>358</sup>*

In dieser Schlussfolgerung stellt GARDNER fest, dass die (Fach-) Disziplin<sup>359</sup> erheblich mit der Kreativität in Wechselwirkung steht. Weiterhin folgert GARDNER, dass die Ausprägung einer bestimmten Intelligenz mit der Wahl der Disziplin korreliert, in der eine Person tätig sein will. Wie unterscheiden sich also die kreativen Momente in den Aktivitäten der Produktentstehung in Abhängigkeit der jeweiligen Disziplin?

Generell benötigt jede Lebenszyklusaktivität des iPeM Kreativität für ihre Umsetzung.<sup>360</sup> So erfordert die *Projektierung* Kreativität bei der Schaffung alternativer Lösungen, wenn beispielsweise der erreichte Projektfortschritt nicht dem geforderten Projektstand entspricht oder wenn die zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht den benötigten Ressourcen entsprechen. Weiterhin müssen in der *Profilfindung* die Anforderungen des Marktes erkannt werden, um daraus Produktprofile ableiten zu können.<sup>361</sup> Dieses „Ableiten“ von Produktprofilen deutet schon auf den vorherrschenden kognitiven Mechanismus hin: Produktprofile werden durch Anordnen der erhaltenen Informationen unter Nutzung der konvergenten Produktion<sup>362</sup> synthetisiert.

<sup>358</sup>Gardner (1996), S. 442

<sup>359</sup>Unter Domäne versteht GARDNER einen Tätigkeitsbereich und führt als Beispiele hierfür die Physik, Biologie, Mathematik, Chemie, etc. an, vgl. Gardner (1996), S. 460. Da diese als Fachgebiete der Wissenschaft bzw. Einzelwissenschaften dem in Abschnitt 4.3 eingeführten Begriff der Disziplin entsprechen, wird im Folgenden der Begriff Disziplin weiter verwendet

<sup>360</sup>Dieses wird im iPeM schon dadurch impliziert, dass jede Lebenszyklusaktivität als separater Problemlösungsprozess aufgefasst wird. Dieser Problemlösungsprozess wird durch „SPALTEN“ weiter untergliedert und enthält somit jeweils die Generierung „Alternativer Lösungen“. Um alternative Lösungen generieren zu können, wird also ein entsprechendes kreatives Moment in dieser Problemlösungsaktivität und damit auch in jeder Lebenszyklusaktivität benötigt.

<sup>361</sup>Dieses gilt insbesondere für Market Pull Innovationen.

<sup>362</sup>Vgl. 2.9.1

Die Ausbildung der kreativen Momente ist in diesen beiden Aktivitäten zunächst wenig disziplinspezifisch; die gemachten Ausführungen gelten sowohl für die Entwicklung mechanischer wie auch elektronischer Produkte.<sup>363</sup> Insbesondere in der Ideenfindung, der Prinzip- und Gestaltmodellierung sowie der Validierung lassen sich aber disziplinspezifische Unterschiede vermuten. Daher sollen diese Aktivitäten im Folgenden nach Disziplinen aufgeschlüsselt genauer betrachtet werden.

## Maschinenbau

Nach erfolgreich durchgeführter Profilsynthese basiert die Entwicklung mechanischer Komponenten und Systeme im Wesentlichen auf der Generierung geeigneter Funktions-Gestaltzusammenhänge. Hierbei spielen die Aktivitäten Ideenfindung, Prinzip- und Gestaltmodellierung und Validierung die zentrale Rolle, da in ihnen die wechselseitige Analyse und Synthese der Funktions-Gestaltzusammenhänge zur Produktentwicklung<sup>364</sup> stattfindet.

Die **Analyse** mechanischer Systeme dient dabei neben der Beurteilung des Grades der Funktionserfüllung zunächst zur Interpretation einer Gestalt bezüglich ihres funktionalen Inhalts. Dieses Interpretieren ist wesentlich für das Erlangen von Gestaltungswissen und erfolgt vor allem unter Nutzung der visuellen Betrachtung. Hierbei können entweder das System selbst oder Modelle des Systems (wie beispielsweise Abbildungen, Fotos, Zeichnungen, 3D-CAD-Modelle, etc.) genutzt werden. Die unbekannte Gestalt des Systems bzw. seiner Elemente wird dabei mit bereits kognitiv verfügbaren (also bekannten) Gestaltungen verglichen. Wird eine Ähnlichkeit zwischen unbekannter, zu analysierender und bekannter Gestalt entdeckt, kann bei bekanntem Funktions-Gestaltzusammenhang durch Analogiebildung auf die Funktion des unbekanntes Systems geschlossen werden.

Zur Analyse eines mechanischen Systems können visuelle Sinneseindrücke durch verschiedene Hilfsmittel (z.B. Mikroskopie, Endoskopie, etc.) und Vorrichtungen (z.B. Schnittmodelle, etc.) unterstützt oder durch weitere Sinneseindrücke ergänzt werden. So vermittelt die haptische Erfahrung Eindrücke von Gewicht, Temperatur, Oberflächenbeschaffenheit, Passgenauigkeit, Auswirkungen von Verschleiß (Kratzen, Schleifen) etc. eines mechanischen Systems. Weiterhin dienen auditive Eindrücke dazu, Fehlfunktionen zu identifizieren und zu lokalisieren (z.B. „Klopfen“ eines Motors, Quietschen von Lagern). Zusätzlich können olfaktorische Eindrücke die Analyse eines mechanischen Systems unterstützen - so kann entsprechender Geruch auf heißgelaufene Lager oder überlastete organische Reibbeläge hindeuten, vgl. Beispiel „Fehlersuche“ in Kapitel 4.4.1. Gustatorische Eindrücke werden bei der Analyse technischer Systeme typischerweise nicht genutzt.

In der *Synthese* werden die im Zielsystem formulierten, gewünschten Funktionen

<sup>363</sup>vgl. Schweizer (1989), der für die „frühen Phasen“ der Produktentwicklung in der Mikroelektronik prinzipiell die gleichen Methoden präsentiert, wie sie auch in PEP des Maschinenbaus genutzt werden.

<sup>364</sup>Vgl. Albers et al. (2012c)

in konkret gestaltete Objekte überführt. Durch die *Synthese* werden somit Funktions-Gestaltzusammenhänge geschaffen. Diese Verknüpfung von Funktion und Gestalt kann im Maschinenbau bis heute im Allgemeinen nicht automatisiert, sondern muss durch den Menschen geleistet werden<sup>365</sup>. In der Schaffung von Funktions-Gestaltzusammenhängen manifestiert sich dabei das im Maschinenbau wesentliche kreative Moment. Nach Guilford<sup>366</sup> lässt sich dieser Schritt im Structure-of-Intellect Modell der divergenten Produktion zuordnen.

Das Verstehen eines vorhandenen Funktions-Gestaltzusammenhangs in der Analyse oder die Überführung einer abstrakten, gestaltlosen Funktion in eine konkrete Gestalt in der Synthese erfolgt also insbesondere unter Nutzung bildlich-räumlicher Intelligenz und Kreativität.

### **Mikroelektronik**

Sobald in der Mikroelektronikentwicklung das Produktprofil beschrieben ist, bewegt sich der Konstrukteur mikroelektronischer Systeme auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, um auf unterschiedliche Aspekte mikroelektronischer Systeme zu fokussieren. Die Entwicklung dieser Systeme geschieht dabei nahezu vollständig gestaltneutral und basiert stattdessen auf der logischen Verknüpfung einer vergleichsweise kleinen Anzahl immer gleicher Elemente (p/n- bzw. n/p-Übergänge, Kapazitäten, Verbindungen).<sup>367</sup> Durch die exakte Beschreibbarkeit der Elemente und durch umfassende, vereinheitlichte Entwurfssprachen kann die Synthese auf verschiedenen Abstraktionsebenen erfolgen, die Kohärenz der dabei gebildeten Produktmodelle untereinander bleibt dabei erhalten. Zur Entwicklung mikroelektronischer Systeme wird ebenfalls Kreativität benötigt, da auch hier eine gewünschte - in diesem Fall aber mathematische - Funktion auf unterschiedliche Weise unter Nutzung unterschiedlicher Architekturen, Verknüpfungen, logischer (Boole'scher) Elemente etc. realisiert werden kann. Gleichzeitig ordnet Guilford das logische Denken, wie es zum Lösen mathematischer Gleichungen eingesetzt wird, der konvergenten Produktion zu. Diese unterscheidet sich deutlich von der divergenten Produktion, die typischerweise genutzt wird zur Generierung der oben beschriebenen Funktions-Gestaltzusammenhänge. Die Entwicklung mikroelektronischer Produkte findet also insbesondere unter Nutzung der logisch-mathematischen Intelligenz und Kreativität statt. Zwar müssen die logisch-mathematisch hergeleiteten (mathematischen) Funktionen ebenfalls in eine Gestalt überführt werden, um nutzbar zu werden. Allerdings ergibt sich der Funktions-Gestaltzusammenhang in der Elektronik durch den hohen Grad an Formali-

<sup>365</sup>Es gab zwar gegen Ende des letzten Jahrhunderts Ansätze, die Überführung von Funktion in Gestalt zu automatisieren, allerdings sind sie aufgrund der technischen Komplexität nie realisiert worden. Vgl. hierzu beispielsweise Roth (1982)

<sup>366</sup>vgl. Abschnitt 2.9.1

<sup>367</sup>Eine Folge hiervon ist, dass ab einer bestimmten Abstraktionsebene die weitere Detaillierung vollautomatisiert ablaufen kann und inzwischen ablaufen muss, da die Komplexität heutiger Mikroelektronik oftmals zu hoch ist, um noch durch den Menschen beherrscht zu werden, vgl. Abschnitt 2.6.2.

sierung zwangsläufig, bildlich-räumliche Kreativität ist hierzu nicht mehr notwendig. Dieses zeigt sich auch an der strengen Entkopplung der Funktions- und Gestaltmodellierung in der Mikroelektronik im Gegensatz zur Nicht-Trennbarkeit der Funktions- und Gestaltmodellierung im Maschinenbau.

#### 4.3.4 Symbolsysteme in den Disziplinen

Die Erkenntnis, dass Akteure unterschiedlicher Disziplinen auf Kommunikationshürden stoßen, sobald sie gemeinsam Produktentwicklung betreiben, führte und führt noch immer zu multidisziplinären Forschungsanstrengungen und zur Entwicklung von Ansätzen, die die Integration und das gegenseitige Verständnis fördern sollen (Ontologien, Referenzprozesse, V-Modell). Während diese Art von Hürden hier nicht weiter betrachtet werden sollen, führen unterschiedliche Disziplinen zu einem weiteren Aspekt, der kognitive Denkprozesse bestimmt und zur Disziplinbarriere beiträgt.

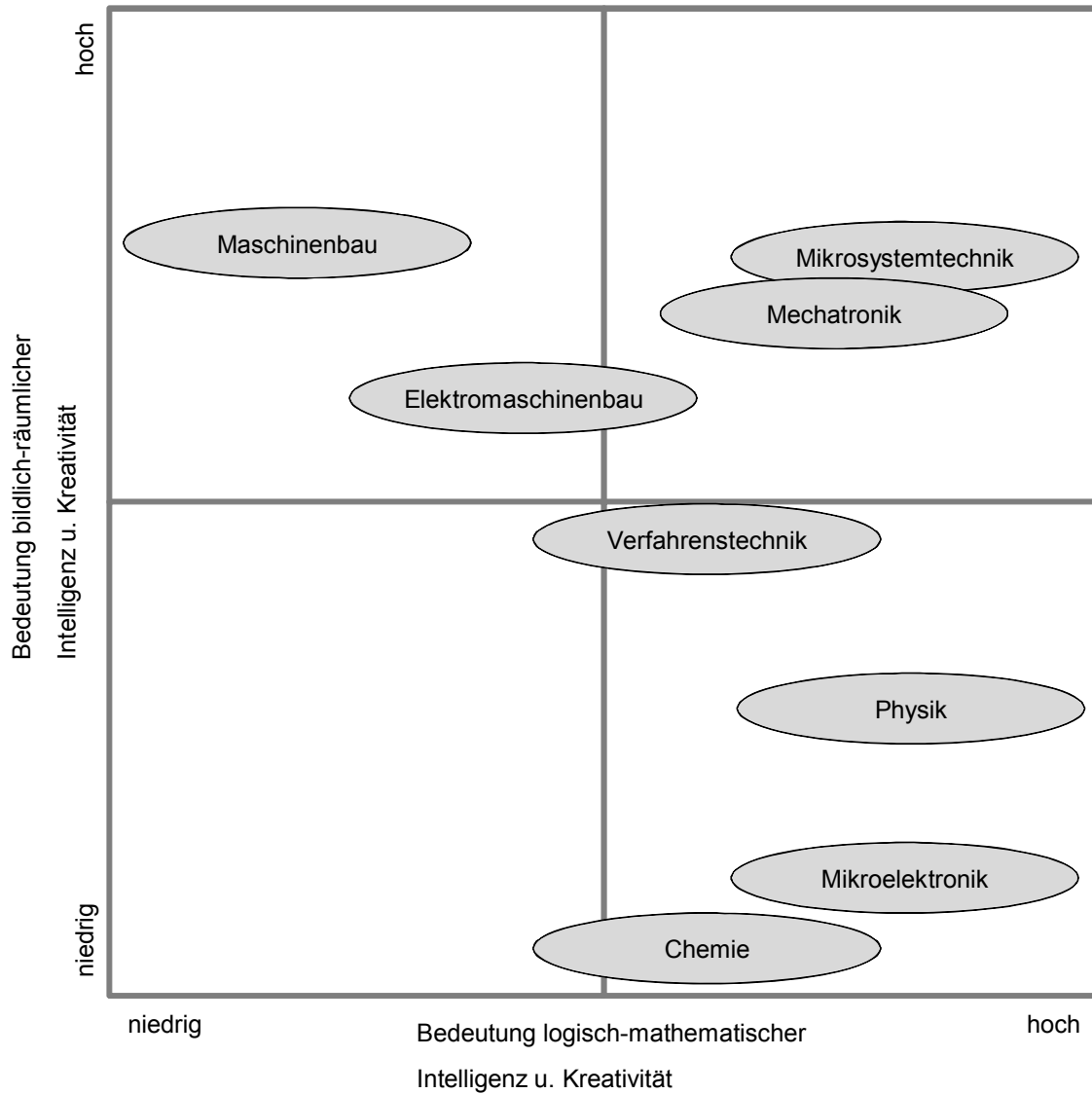
In Abhängigkeit von der jeweiligen Disziplin nutzen Personen verschiedene Symbolsysteme<sup>368</sup>, die bei kognitiven Prozessen zur Anwendung kommen. Die Produktentwicklung innerhalb einer Disziplin ist also geprägt durch die Nutzung adäquater, erfolgversprechender Symbolsysteme. Die Nutzung eines bestimmten Symbolsystems erfordert nach GARDNER spezifische geistige Fähigkeiten. In Abbildung 4.6 wird diese Erkenntnis qualitativ auf verschiedene technische Disziplinen übertragen. Dadurch konnte dargestellt werden, wie ein Konstrukteur, der in einer bestimmten Disziplin ausgebildet wurde, auf die für die technische Produktentwicklung wesentlichen Intelligenzen und Kreativitäten (bildlich-räumlich, logisch-mathematisch) geprägt ist.

In einem weiteren Portfolio in Abbildung 4.7 wird analog zur vorherigen Abbildung 4.6 verschiedene (disziplinspezifische) Systeme angeordnet, um darzustellen, welche Intelligenzen und Kreativitäten für die Entwicklung eines bestimmten Systems vorrangig sind. Die Anordnung soll auch hier wieder nur zur qualitativen Orientierung dienen. Sie wurde basierend auf den typischen Vorgehensweisen verschiedener Disziplinen zur Produktentwicklung, wie sie in Kapitel 2 erarbeitet und dargestellt wurden, sowie basierend auf den Erfahrungen des Verfassers aus verschiedenen Produktentwicklungsprojekten abgeschätzt.

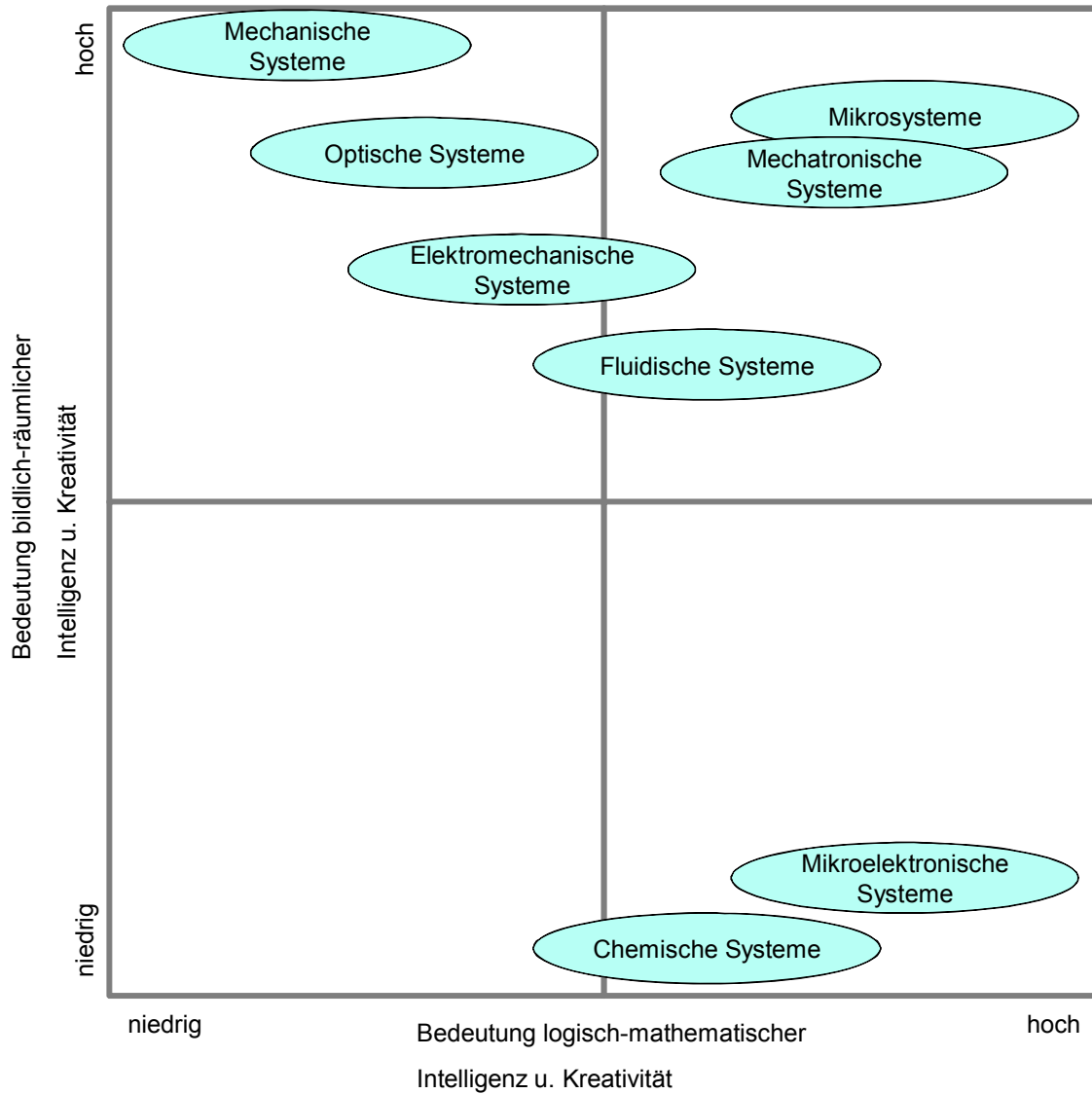
In der Mikrosystemtechnik, deren Konstrukteure unterschiedlichsten Disziplinen entstammen, kann die Prägung eines Konstrukteurs auf disziplinspezifische Vorgehens- und Denkweisen je nach Tätigkeit im PEP förderlich oder hinderlich sein. Als problematisch ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Prägung der Mikrosystemtechnik durch die Mikroelektronik zu bewerten.<sup>369</sup> Deren insbesondere logisch-mathematisch geprägten Denkweisen in der Sys-

<sup>368</sup>Vgl. Gardner (1996), S.443. Symbolsysteme können Wörter als Kürzel wissenschaftlicher Vorstellungen, mathematische Gleichungen, komplexe Raummodelle, Farben, Strukturen, Timbre, Klang, etc. sein.

<sup>369</sup>Vgl. hierzu die Auffassung, dass Mikrosysteme als „gegenüber dem Entwurf von integrierten Schaltungen erweiterte Disziplin, keine neue Disziplin“ einzustufen sei Eigler (1994), S. 5.

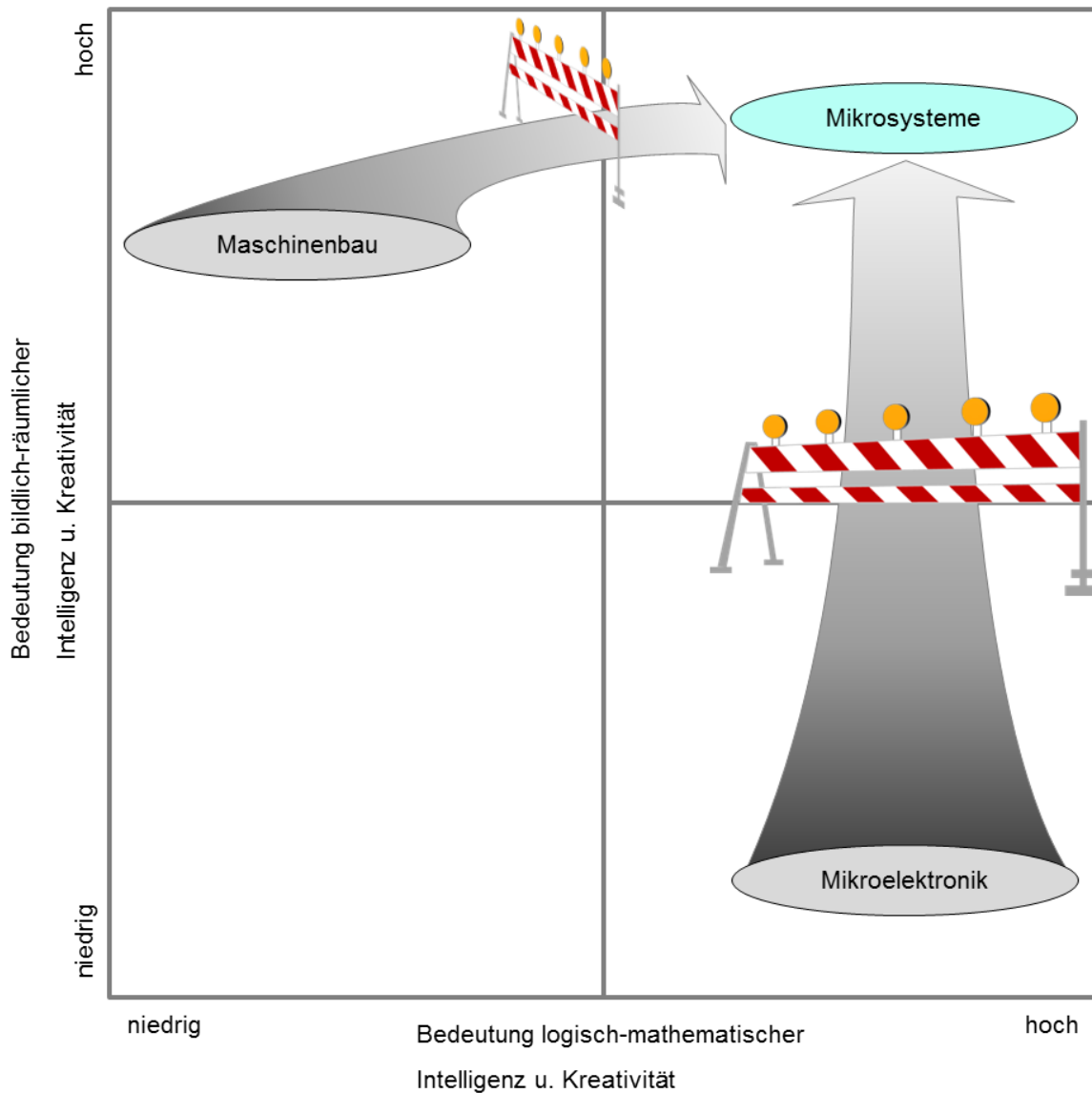


**Abbildung 4.6** Disziplinspezifische Prägung verschiedener Intelligenzen und Kreativitäten.



**Abbildung 4.7** Benötigte Arten von Intelligenz und Kreativität bei der Synthese von Systemen.

temsynthese stehen z.B. im Widerspruch zu den in der Mechanikentwicklung typischerweise erfolgreichen bildlich-räumlichen Denkweisen, vgl. Abbildung 4.8. Diese Überlegungen gelten natürlich auch in entgegengesetzter Richtung, wenn also z.B. ein auf bildlich-räumliches Denken geprägter Maschinenbauingenieur die Konstruktion einer elektronischen Funktion durchführen soll, für die logisch-mathematische Denkweisen besser geeignet sind.



**Abbildung 4.8** Diskrepanzen zwischen Prägung disziplinspezifischer Intelligenz und Kreativität und deren Nutzung bei der Synthese von Systemen.

### 4.3.5 Zwischenfazit

Stellt man den Intelligenzbegriff und dessen Modellvorstellungen den disziplinspezifischen Produktentstehungsprozessen wie sie in Abschnitt 2.6 beschrieben sind und insbesondere

der Ausprägung der in ihnen vorherrschenden kreativen Momente<sup>370</sup> gegenüber, erkennt man starke Korrelationen zwischen beiden. So basiert die Entwicklung von Funktionen in mechanische Produkte vor allem auf der bildlich-räumlichen Intelligenz<sup>371</sup>, während die Entwicklung von Funktionen in elektronische Systeme oder in Software vor allem auf der Nutzung der logisch-mathematischen Intelligenz beruht.

In der Mikroelektronik besitzt die geometrische Herabskalierung funktionaler Strukturen im Gegensatz zur Mikrosystemtechnik keinen Einfluss auf die Analyse und Synthese von Systemen, da mikroelektronische Grundelemente in ihrer Funktion eindeutig beschrieben werden können und diese abstrakte Beschreibung unabhängig von der Größe der Systemelemente gültig ist und durch Logik erfassbar ist. Durch logische Kopplung und Aneinanderreihung dieser Elemente lassen sich beliebig komplexe Gesamtsysteme und Gesamtfunktionen realisieren, für deren Entwicklung kaum bildlich-räumliche Intelligenz und Kreativität nötig wären. Lediglich die Gestaltung der Architektur mikroelektronischer Systeme bietet geringe Möglichkeiten zur geometrisch-stofflichen Gestaltung.

Diese Unterschiede begründen entsprechende Unterschiede in der Lehre und Ausbildung von Konstrukteuren in den verschiedenen Disziplinen und prägen ihre Denkweisen.<sup>372</sup> Die in der Mikrosystemtechnik tätigen Konstrukteure – also Mikrosystemtechniker, Elektrotechniker, Physiker, Maschinenbauer, Chemiker, etc. – bringen ihre eigenen, disziplingeprägten Vorgehensweisen ein.

Zusätzlich liegen die Wurzeln der Mikrosystemtechnik in der Mikroelektronik<sup>373</sup>. Somit wurden anfangs auch deren Vorgehens- und Denkweisen bei der Entwicklung übernommen. Zusammen mit einer logisch-mathematisch orientierten Ausbildung der Vorgehensweisen zur Ideenfindung oder Prinzip- und Gestaltmodellierung können Mikrosystemkonstrukteure in der Folge Probleme haben, diese Aktivitäten durchzuführen, die (zumindest auf mechanischer Seite) vor allem die bildlich-räumliche Intelligenz betonen. Andererseits können Konstrukteure, die zur Ideenfindung und Prinzip- und Gestaltmodellierung eine bildlich-räumlich orientierte Denkweise verinnerlicht haben, Probleme bei der Durchführung dieser Aktivitäten auf Basis logisch-mathematischer Denkweisen, wie sie z.B. bei der Schaltkreisentwicklung benötigt werden, haben. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 4.9 visualisiert.

Natürlich kennt auch die mechanische Produktentwicklung das logisch-mathematische

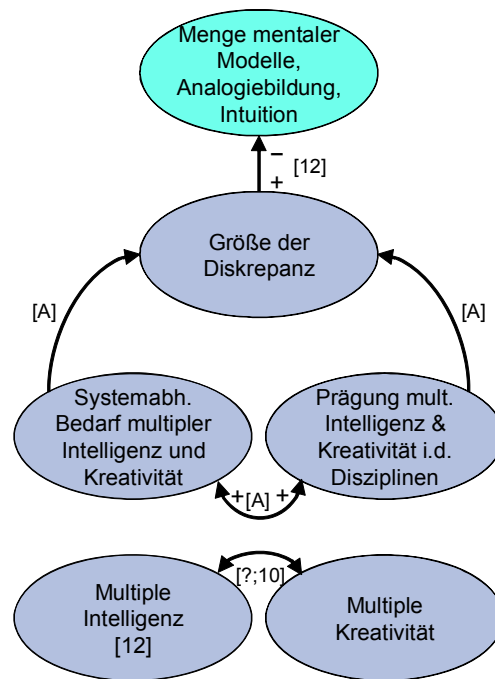
<sup>370</sup>v.a. bei der Ideenfindung oder der Prinzip- und Gestaltmodellierung

<sup>371</sup>Diese Intelligenz zeichnet neben Konstrukteuren und Mechanikern z.B. auch Künstler (Bildhauer, Maler,...) aus und veranlasste schon Redtenbacher (1859) – den Begründer der Konstruktionslehre und Vorgänger von ALBERS – zu der Aussage, dass „*das Erfinden und Machen des Technikers [...] nicht bloß auf Wissenschaft und Handwerk, sondern gerade auf Geistestätigkeiten [beruht], die künstlerisch genannt werden müssen. [...] Die Bewältigung der hohen Gesamtkomplexität basiert auf der Erfahrung und Kunst des genialen bzw. tüchtigen Konstrukteurs und seiner engen Kooperation mit der Werkstatt.*“

<sup>372</sup>Dies ist ein Grund, weshalb echte Interdisziplinarität und mechatronische Produktentwicklung immer noch als sehr schwierig und komplex empfunden werden und aktuell zu entsprechenden grundlagenorientierten interdisziplinären Forschungsprojekten wie dem SFB 588 „Humanoide Roboter“ führen.

<sup>373</sup>Vgl. CalTech (2011)





**Abbildung 4.9** Multiple Intelligenz und Kreativität beeinflussen die mentalen Modelle und den Umgang mit ihnen. Die Legende zur Abbildung befindet sich in der Fußnote auf Seite 82.

Vorgehen in der Ideenfindung und Prinzip- und Gestaltmodellierung und nutzt zu ihrer Unterstützung z.B. entsprechende diskursive Kreativitätsmethoden. Weiterhin wird die logisch-mathematische Intelligenz ganz allgemein zur Auslegung und Dimensionierung von Produkten genutzt. Aber im Wesentlichen basiert die Tätigkeit des Konstrukteurs mechanischer Systeme in der Ideenfindung und Prinzip- und Gestaltmodellierung auf dem Erdenken neuer Funktions-Gestaltzusammenhänge.

Im Grundlagenkapitel wurden die Produktentstehungsprozesse der Disziplinen der Mikro-systemtechnik in ihren wesentlichen Grundzügen charakterisiert. Hier zeigte sich, dass die Produktentstehungsprozesse mechanischer, elektronischer und softwaretechnischer Produkte sehr unterschiedlich ablaufen und damit auch die Vorgehensweisen der jeweiligen Produktentwickler stark voneinander abweichen. Im Kern unterscheiden sich diese Prozesse in ihrer Produktmodellierungsaktivität: während die Modellierung mechanischer Systeme eine gekoppelte und gleichzeitige Betrachtung von Prinzip und Gestalt umfasst, lassen sich die Modellierungsaktivitäten mikroelektronischer Systeme separieren in eine getrennte Prinzip- und Gestaltmodellierung und sequentiell bearbeiten.

## 4.4 Die Intuitionsbarriere

Auf Basis der Ähnlichkeitstheorie, vgl. Abschnitt 2.10, lassen sich prinzipiell alle Effekte, die in der Mikrosystemtechnik auftreten, rechnerisch beschreiben. Der Verfasser dieser Arbeit hat

in verschiedenen Produktentwicklungsprojekten mit Industrieunternehmen aber die Erfahrung gemacht, dass völlig neue Ideen für Produkte und die Generierung entsprechender Funktions-Gestaltzusammenhänge nur selten von rechnerischen Zusammenhängen ausgehen. Viel ergiebiger scheint hingegen die Nutzung der Intuition und von Analogien zu sein, die vor allem durch die Gegebenheiten der Umgebung des Menschen in seiner „menschlichen“ Größenordnung gebildet und geprägt wurden. Somit ergibt sich auch für den Konstrukteur von Mikrosystemen ein Skalierungsproblem, wenn er seine Intuition und Analogien zur Konstruktion von Mikrosystemen einsetzen will.

Zu Beginn der Entwicklung der Mikro-Gasturbine, vgl. Abschnitt 2.5, besaß der zentrale Systemkonstrukteur<sup>374</sup> und Koordinator der Demonstrationssystementwicklung nur geringe Erfahrung in der Konstruktion von Mikrosystemen. Dadurch fehlte ihm zunächst mikrospezifisches Konstruktionswissen. Die Möglichkeiten und Grenzen der – im Rahmen des SFB 499 zu nutzenden – urformenden Produktionstechnologien waren zwar über Konstruktionsregeln und Entwurfsmuster eingängig und schnell nachvollziehbar. Seine Intuition und die Analogiequellen waren aber makroskopisch geprägt und führten in der Folge zu suboptimalen Gestaltungen des Demonstrationssystems. Einige dieser Probleme wurden zwar schon während der Entwicklung identifiziert, zum Teil aber aufgrund der Zielsetzungen, die mit der Mikro-Gasturbine als Demonstrationssystem verfolgt wurden, dennoch beibehalten. So ergab sich durch die Herabskalierung einer axialen Gasturbine<sup>375</sup> das Problem, dass die Spaltverluste an den Enden der Lauf- und Leitbeschaufelung relativ groß werden. Der Grund hierfür liegt in den Fertigungsabweichungen, die – obwohl absolut betrachtet das Genaueste, was heutige urformende Verfahren zu leisten vermögen – relativ in Bezug zu den Gesamtabmessungen des Demonstrationssystems betrachtet mindestens eine Größenordnung größer sind als in einem makroskopischen System. Die Fertigungsabweichungen skalieren also nicht in gleicher Weise wie die Gesamtabmessungen eines Systems.

Ein weiterer mikrospezifischer Effekt, der das makroskopisch geprägte Design der Gasturbine in Mikrodimensionen ineffizient macht, ist die Wärmeleitfähigkeit. Während die Gesamtabmessungen des Systems verringert wurden, können die Wärmeleitfähigkeiten der gewählten Materialien nicht skaliert werden. Dies führt in dem gewählten Design zu einer extrem starken Wärmeleitung aus dem heißen Turbinenteil in den kälteren Verdichterteil. Die Effizienz einer Gasturbine ist aber direkt abhängig von einer möglichst niedrigen Verdichter- und einer möglichst hohen Turbinentemperatur. Zusätzlich führen die für Mikrosysteme typischen sehr hohen Oberflächen-/Volumenverhältnisse<sup>376</sup> zu einer verstärkten Wärmeleitung an Stellen innerhalb oder außerhalb des Systems, die die Effizienz der Energieumsetzung

---

<sup>374</sup>...und Verfasser dieser Arbeit

<sup>375</sup>Die Wahl der Bauart von Verdichtern und Turbinen ist im Allgemeinen abhängig von ihrer Baugröße. So wird die axiale Bauart zugunsten der radialen Bauart seltener eingesetzt, je kleiner das System wird. Die Gründe hierfür waren dem Konstrukteur zwar schon zu Beginn der Entwicklung bekannt, dennoch wurde die axiale Bauart aus SFB-spezifischen Gründen für die Mikro-Gasturbine weiter verfolgt.

<sup>376</sup>Vgl. Abschnitt 2.10

weiter reduzieren. Ab einer bestimmten Baugröße wird die erzeugte Leistung vollständig zur Kompensation der Verluste (Spaltverluste, Wärmeverluste, etc.) aufgewendet – die Grenze der Selbsterhaltung, die minimale Baugröße und die Funktionsgrenze des gewählten Lösungsprinzips sind damit erreicht.

Anhand dieses Beispiels wird das folgende Zitat nachvollziehbar und seine Tragweite gerade für die Mikrosystementwicklung deutlich:

*„Verändert man alle Abmessungen eines Systems, so ändert sich in der Regel auch die Funktion. [...] Daß die gleichmäßige Veränderung aller Abmessungen auch die Funktion verändert, wurde in seiner vollen Tragweite zuerst von Galileo Galilei erkannt.“<sup>377</sup>*

Wie schon im oben genannten Beispiel angedeutet, sind dem Mikrosystemkonstrukteur wesentliche physikalische Zusammenhänge zwar bekannt oder können hergeleitet werden. Trotzdem treten bei der Suche nach Funktions-Gestaltzusammenhängen nicht die Ideen in den Vordergrund, die unter Berücksichtigung geänderter physikalischer Zusammenhänge „die richtigen“ wären, sondern die, die dem Konstrukteur in seinem beruflich-privaten Umfeld begegnen:

*„Auch die Zusammenhänge, die sich eigentlich relativ leicht aus den physikalischen Gesetzen ableiten lassen, können uns verborgen bleiben, da wir kein Gefühl für kleine Dinge haben. Der Mensch unterscheidet sich von den größten Lebewesen nur um etwa eine Zehnerpotenz, während die kleinsten Lebewesen um ca. 7 Zehnerpotenzen kleiner sind. Unsere Lebensgewohnheiten und unser Gefühl für das physikalische Verhalten von Objekten und Vorgängen orientiert sich am Makromaßstab, uns fehlt daher die Intuition für das Verhalten im Mikromaßstab.“*

378

Kasper gibt also einen ersten Hinweis auf die Intuitionsbarriere in der Mikrosystemtechnik. Die Bedeutung und die Tragweite dieser Barriere werden vor allem dann deutlich, wenn sie in Relation zur relativ geringen Reife der Mikrosystemtechnik gesetzt wird. So *„[...] ist der Mikrosystem-Entwurf noch durch ein hohes Maß an Intuition, heuristisches Vorgehen sowie wenig Durchgängigkeit und unvollständige Automatisierbarkeit von Entwurfsschritten gekennzeichnet.“<sup>379</sup>*

Im Folgenden sollen die Gründe für das Entstehen der Intuitionsbarriere ermittelt werden. Dabei wird deutlich, weshalb im Mittelpunkt der Produktentstehung der Mensch steht und entsprechende Berücksichtigung finden muss.

---

<sup>377</sup>Kasper (2000), S. 9

<sup>378</sup>Kasper (2000), S. 25

<sup>379</sup>Schwarz et al. (1996), S. 119

### 4.4.1 Das Wahrnehmungsparadoxon

*„Did you know that there is a microsystem helping you work better, live safer or even play harder? Interestingly, these embedded components have been around for many years, unnoticed but highly critical to many of our everyday operations.“<sup>380</sup>*

#### Menschliche Sinne vs. Messgeräte

Es existiert die Auffassung, dass es erkenntnistheoretisch irrelevant ist, ob eine Beobachtung durch direkte oder indirekte Empfindung gemacht wird.<sup>381</sup> Diese Auffassung soll hier nochmals genauer diskutiert werden. Die Aussage, Beobachtungen würden prinzipiell auf die gleiche Art und Weise unter Nutzung der gleichen mentalen Prozesse und unabhängig von ihrer Entstehungsgeschichte verarbeitet, ist auf Basis der durch den Verfasser dieser Arbeit gesichteten Fachliteratur als korrekt zu bewerten und gegebenenfalls nur durch einen Neuropsychologen zu widerlegen. Gleichzeitig lässt sich aber auf Basis der gesichteten Literatur und auf Basis eigener Erfahrungen vermuten, dass es für die „ganzheitliche Erkenntnis“ eines Objekts eben doch einen Unterschied macht, ob eine Beobachtung durch direkte oder indirekte Empfindungen<sup>382</sup> gewonnen wurde.

#### Beispiel: Fehlersuche an einer Gasturbine

Als Beispiel soll hier die Fehlersuche an einer makroskopischen Gasturbine dienen, dessen hydrodynamisches Gleitlager nicht ausreichend mit Schmierstoff versorgt wird und somit zu einem unruhigen Laufverhalten des Rotors führt. Der Entwicklungsingenieur (Beobachter A) wird die Ursache des Problems vermutlich relativ schnell eingegrenzt haben: die Verbrennung der Turbine *hört* sich völlig normal und konstant an, während das Lager reibungsinduzierte Schwingungen verursacht, die deutlich als Quietschen *hörbar* sind, es sind keine defekten oder falsch angeschlossenen Treibstoffleitungen zu *sehen*, wohingegen das Schmiermittel im heißgelaufenen Lager einen typischen Überhitzungs*geruch* erzeugt und sich die Lagerstelle und der Schmierstoffbehälter ungewöhnlich heiß *anfühlen*. Ohne auch nur ein Bauteil demontiert zu haben, hat Beobachter A bereits die Ursache des Problems eingegrenzt.

Durch den Einsatz von Messgeräten können zwar Effekte sensiert werden, die dem Menschen ansonsten nicht zugänglich sind. Gleichzeitig wird als Adapterkanal aber nahezu ausschließlich das visuelle und selten das auditive Empfinden genutzt, während die anderen Kanäle völlig ungenutzt bleiben. Der Einsatz von Messtechnik erweitert somit auf der einen Seite die Wahrnehmung, schränkt die Möglichkeiten zur Empfindung eines Systems auf der anderen Seite aber gleichzeitig stark ein. Was das für den Erkenntnisprozess bedeutet,

<sup>380</sup>Wicht / Bouchaud (2005), S. 7

<sup>381</sup>Vgl. Abschnitt 2.8.7; vgl. Nachtigall (2010), S. 16 f.

<sup>382</sup>Vgl. Definition der Begriffe in Abschnitt 2.8.7

soll am Beispiel der Fehlersuche an einer Mikro-Gasturbine in Analogie zur Fehlersuche an einer makroskopischen Gasturbine (s.o.) diskutiert werden. Hierbei ist das gesamte System aufgrund seiner Größe nicht mehr direkt zugänglich für die menschlichen Sinne, sondern muss zur Fehlersuche durch den Einsatz entsprechender Messtechnik charakterisiert werden. Die genutzten Messgeräte übernehmen somit die Funktion von „Reizwandlern“ oder „Reizadaptoren“, die es ermöglichen, bestimmte Effekte für den Menschen zugänglich und kognitiv verarbeitbar zu machen.

### **Beispiel: Fehlersuche an einer Mikro-Gasturbine**

Eine visuelle Betrachtung des Systems wäre durch bildgebende Verfahren und Messgeräte trotz der reduzierten Systemabmessungen immer noch möglich, allerdings müsste der Betrachtungswinkel, der Bildausschnitt, die Vergrößerung etc. durch Justage des Messsystems durch einen Beobachter B eingestellt werden. Temperaturen könnten am System durch Thermosensoren, wirkende Kräfte und Momente durch Dehnmessstreifen aufgenommen werden. Auch hier ist die Aussagekraft des Messergebnisses ähnlich wie bei den bildgebenden Verfahren abhängig von der gewählten Messstelle. Diese Messergebnisse lägen schließlich z.B. in Tabellenform vor und könnten z.B. in Form von 2D- oder 3D-Diagrammen repräsentiert werden. Nach entsprechender Interpretation könnte Beobachter B letztlich ebenfalls erkennen, dass die Mangelschmierung im hydrodynamischen Gleitlager den unruhigen Lauf verursacht. Allerdings wird Beobachter B trotz gleichen Analyseergebnisses ein ungleich schlechteres Gefühl und Gespür für das System entwickelt haben als Beobachter A, der alle seine Sinne für die Beobachtung des Systems einsetzen konnte.

Somit erlaubt der Einsatz indirekter Analysemethoden<sup>383</sup> die Ergänzung der menschlichen Sinne durch genauere und tiefere Einblicke in das untersuchte System, gleichzeitig nimmt aber das erfahrbare Gespür für das System immer mehr ab und die Distanz zwischen Entwickler und System zu. Die Notwendigkeit des Einsatzes indirekter Analysemethoden wird umso größer, je kleiner die zu analysierenden technischen Systeme werden. Mit abnehmenden Abmessungen der Systeme nimmt aber auch die Verfügbarkeit nutzbarer indirekter Analysemethoden ab, da die Messgeräte selbst zu groß sind oder das Messprinzip in Mikrodimensionen ebenfalls nicht mehr funktioniert. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

### **Zwischenfazit**

Aus den genannten Beispielen resultiert die eingangs geäußerte Auffassung des Verfassers, dass es eben doch einen Unterschied macht, ob eine Beobachtung auf direktem oder indirektem Empfinden basiert, vgl. Abschnitt 2.8.7. Damit deckt sich die weithin akzeptierte

<sup>383</sup>Vgl. Abschnitt 2.8.7

Auffassung, dass die Informationsspeicherung im menschlichen Langzeitgedächtnis umso schneller und umfangreicher ausfällt, je mehr Sinne an der Informationsaufnahme beteiligt sind.<sup>384</sup>

In der Mikrosystemtechnik sind die Systeme generell zu klein für die direkte Beobachtung mittels menschlicher Sinne, ein Beobachter muss also generell auf Messgeräte zurückgreifen, befindet sich also immer in der Situation wie Beobachter B. Zusätzlich besteht in der Mikrosystemtechnik die Schwierigkeit, dass aufgrund der zu großen Abmessungen der verfügbaren Messgeräte oder der ebenfalls nur begrenzt skalierbaren Funktionsprinzipien der genutzten Messprinzipien viele Effekte weder direkt noch indirekt messbar sind. Um Mikrosysteme zu charakterisieren, werden deshalb vor allem die Rasterelektronenmikroskopie sowie Simulationsmethoden eingesetzt.

DE BONO bezeichnet Wahrnehmung als wichtigsten Teil des Denkens außerhalb hochspezialisierter Fachgebiete<sup>385</sup> und bezieht sich in diesem Zusammenhang auf den experimentellen Nachweis, „[...] dass fast alle Denkfehler Wahrnehmungsfehler sind“<sup>386</sup>:

*[...] In der Frühzeit des Computers gab es ein simples Akronym: GIGO. Das bedeutete Garbage In Garbage Out (Müll rein, Müll raus). Selbst wenn ein Computer einwandfrei arbeitet, liefert er nur Müll, wenn wir Müll eingeben. Genau das Gleiche gilt für die Logik. Wenn Ihre Wahrnehmung begrenzt ist, liefert Ihnen einwandfreie Logik falsche Ergebnisse. [...] Sehr wahrscheinlich ist die Wahrnehmung ein 'Informationssystem, das sich selbst organisiert' [...]. Soche Systeme erlauben es den eingehenden Informationen, Muster [i.S.v. Schemata und mentalen Modellen] zu bilden, in denen unser Denken sich dann verfängt. Wir müssen also unsere Wahrnehmung (Kreativität) erweitern und ändern.“<sup>387</sup>*

DE BONO argumentiert also, dass die Wahrnehmung die Grundlage bildet für „gutes“ Denken und damit für Kreativität.<sup>388</sup> Damit spricht er, ohne es zu wissen, den Kern der hier diskutierten Intuitionsbarriere der Mikrosystemtechnik an und lässt sie in einem grellen Licht erscheinen.

Die diskutierten Zusammenhänge sind in Abbildung 4.10 zusammengefasst und visualisiert. Die Einschränkung der ganzheitlichen Empfindung von Effekten auf der Mikroskala ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

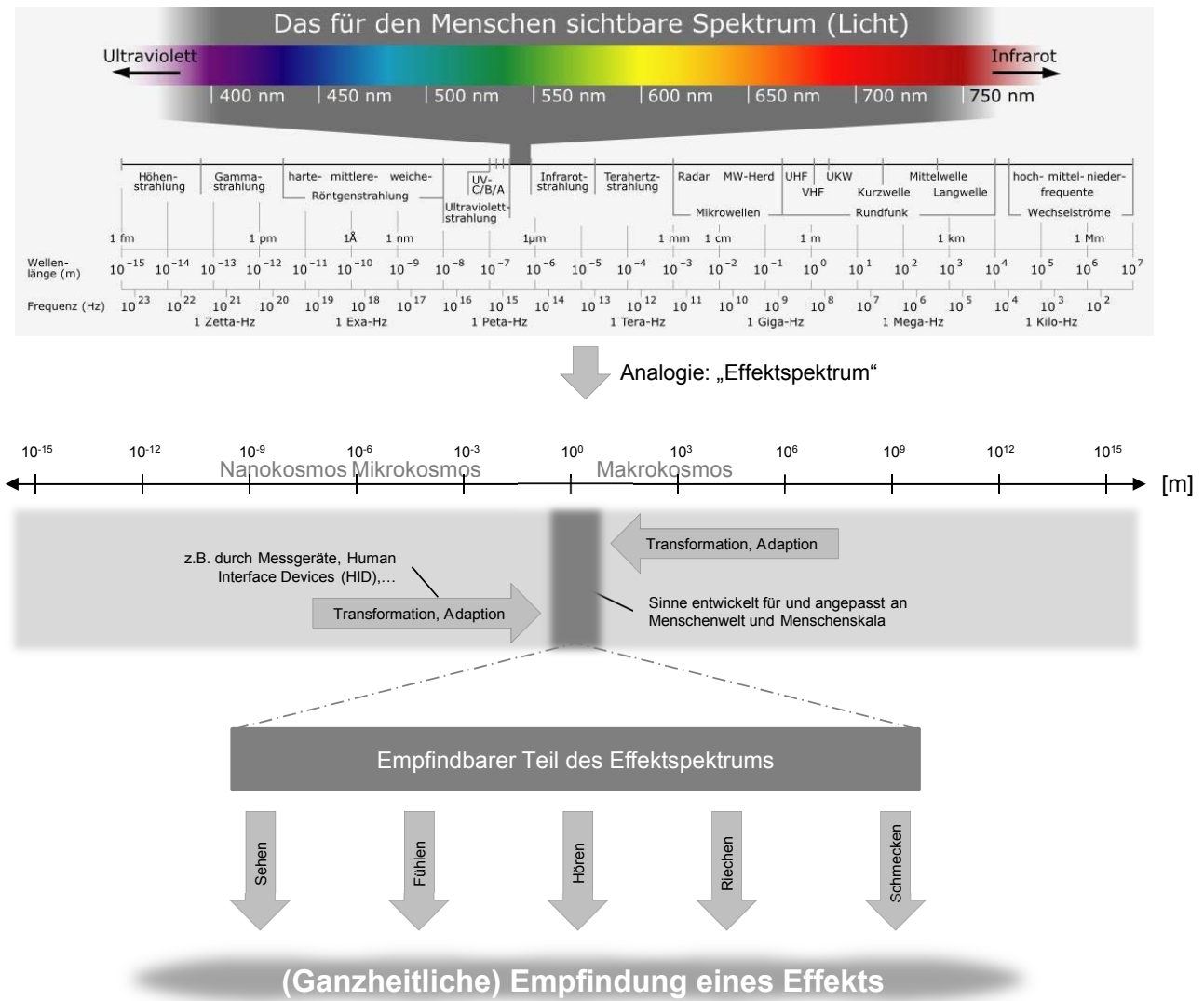
<sup>384</sup>Vgl. auch Universität Duisburg-Essen (2012)

<sup>385</sup>DE BONO spezifiziert nicht weiter, was er mit „hochspezialisierten Fachgebieten“ meint und ob diese Ausnahme auch die Mikrosystemtechnik einschließt. Entsprechend der Argumentation in diesem Kapitel ist die Wahrnehmung auch für die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik der grundlegende – wenn auch momentan stark unterdrückte – Teil des Denkens.

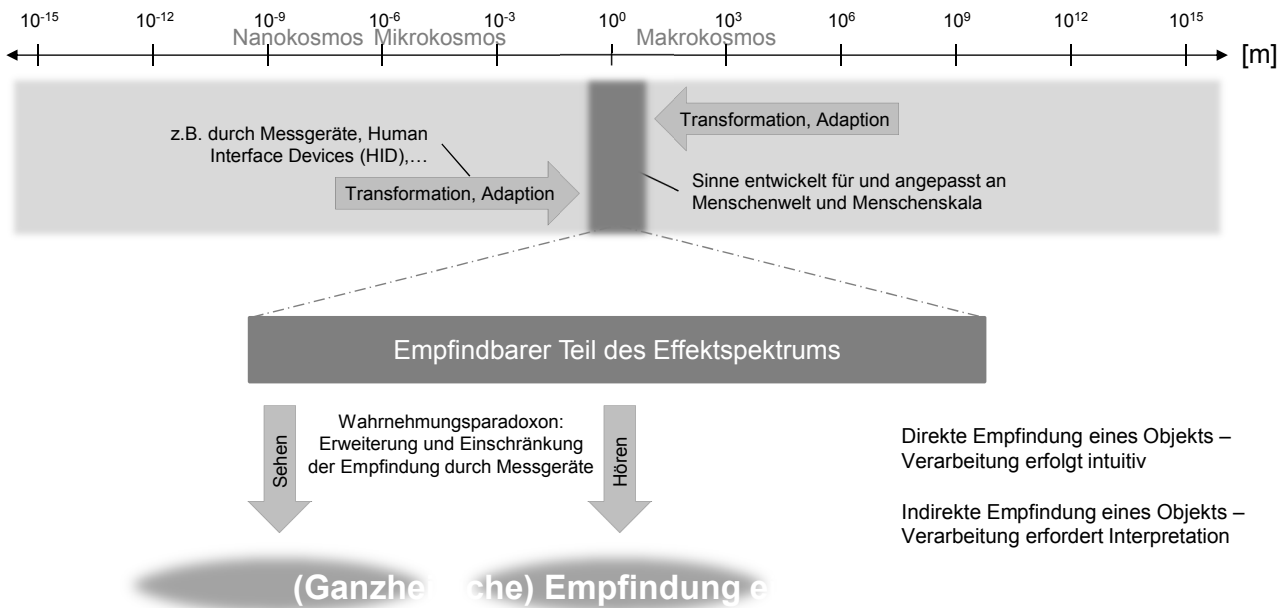
<sup>386</sup>Professor DAVID PERKINS aus Harvard, zitiert nach De Bono (2005), S. 22

<sup>387</sup>De Bono (2005), S. 21 f.

<sup>388</sup>Vgl. De Bono (2005), S. 22



**Abbildung 4.10** Das Effektspektrum als generalisierte Modellvorstellung. Nur der Teil des Spektrums, für dessen Empfindung die menschlichen Sinne evolutionär entwickelt sind, kann durch den Menschen direkt empfunden und die zugehörigen Effekte intuitiv verarbeitet werden. Die Empfindung außerhalb liegender Effekte erfordert Transformationen und Adaptionen. Eigene Darstellung, oberer Bildteil „Elektromagnetisches Spektrum“ entnommen aus Frank et al. (2005).



**Abbildung 4.11** Die Empfindung außerhalb des „menschlichen“ Spektrums liegender Effekte erfordert Transformationen und Adaptionen, deren Verarbeitung erfordert Interpretationen.

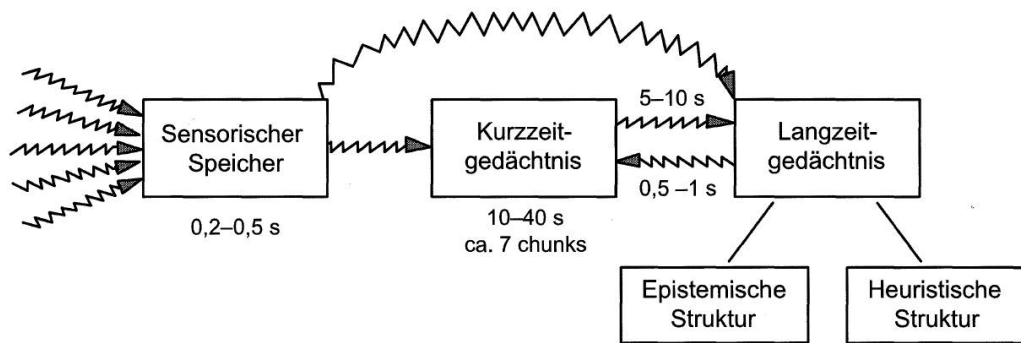
#### 4.4.2 7+/-2 Chunks

Schließlich beeinflusst die Verwendung von Messgeräten die kognitiven Prozesse des Menschen bei der Wahrnehmung in einer weiteren Hinsicht. DÖRNER<sup>389</sup> modelliert das Gedächtnis des Menschen unter Abgrenzung des Ultrakurzzeit-, Kurzzeit- und Langzeitgedächtnisses, vgl. Abbildung 4.12. Während das Ultrakurzzeitgedächtnis als Filter aufgefasst werden kann, das nur die relevanten Informationen in das als Arbeitsspeicher genutzte Kurzzeitgedächtnis vordringen lässt, dient das Langzeitgedächtnis gewissermaßen als Informationsspeicher (Festplatte) über längere Zeiträume. Das Arbeitsgedächtnis verarbeitet nicht alle Informationen auf einmal und auch nicht eine nach der anderen, sondern bildet auf Basis bereits im Langzeitgedächtnis vorhandener Schemata bzw. mentaler Modelle sog. Chunks von Informationen, die gleichzeitig verarbeitet werden können.<sup>390</sup> Nach MILLER kann das Kurzzeitgedächtnis  $7 \pm 2$  Chunks auf einmal verarbeiten. Nun stehen die Chunks, die für die Bedienung von Messgeräten (s.o.) während der Beobachtung eines Systems belegt werden, dem eigentlichen Ziel – nämlich der Analyse eines Systems zum Erkennen von Zusammenhängen – nicht mehr zur Verfügung. Die indirekte Beobachtung wird also im Gegensatz zur direkten Beobachtung auch durch das Chunking weiter eingeschränkt.

<sup>389</sup>Vgl. Dörner (1979), S. 28 f.

<sup>390</sup>Vgl. Miller (1956). Das Lernen der folgenden Zeichenfolge Buchstabe für Buchstabe ist sehr aufwändig: „für chunking ist die Verarbeitung dieser Zeichenfolge ein Beispiel“. Wird diese Zeichenfolge in einzelne Chunks zerlegt, lässt sie sich erheblich besser verarbeiten und einprägen: „Für Chunking ist die Verarbeitung dieser Zeichenfolge ein Beispiel“





**Abbildung 4.12** Gedächtnisstruktur: das Ultrakurzzeitgedächtnis bietet eine Filterfunktion und reduziert die Menge der einströmenden Informationen auf die relevanten. Das Kurzzeitgedächtnis dient als Arbeitsspeicher, das Langzeitgedächtnis dient als Langzeitspeicher. Abbildung entnommen aus Ehrlenspiel (2007), S. 62

### 4.4.3 Skalierungsproblematik

Wie in Abschnitt 4.3.3 diskutiert basiert die Entwicklung mechanischer Funktions-Gestaltzusammenhänge vor allem auf der Nutzung der bildlich-räumlichen Intelligenz. Die dabei ablaufenden Denkvorgänge lassen sich der divergenten Produktion zuordnen, das dazu benötigte kreative Denken wird in der Kognitionspsychologie modelliert als Bildung von Assoziationen und Analogien, aus denen schließlich die Erkenntnis entsteht. Für die Analogiebildung gilt dabei, dass potentielle Analogiequellen bekannt sein müssen, um grundlegende strukturelle Ähnlichkeiten erkennen zu können.

FUNKE weist auf den Kern des hier behandelten Analogieproblems hin<sup>391</sup>, indem er betont, dass kreative Produkte nicht lediglich von kreativen Personen ersonnen werden, sondern dass das kreative Umfeld (vgl. 4P's der Kreativität in Abschnitt 2.9.2) ebenfalls ein wesentlicher Faktor ist, der eine Person erst kreativ werden lässt. Hierbei hat er die kreative Umwelt im Sinne der 4P's der Kreativität im Sinn.<sup>392</sup> Diese Aussage lässt sich aber noch weiter interpretieren und führt auf die zentrale Konstruktionsbarriere in der Mikrosystemtechnik. Das Umfeld ist die natürliche Umgebung (und der natürliche Lebensraum) einer Person, in deren Rahmen die Person handelt und mit anderen Personen und Objekten interagiert. Dabei liefert dieses Umfeld ihr Erkenntnisse über die Funktionsweisen und Zusammenhänge der Welt im Allgemeinen und technischer Systeme im Speziellen. In diesem Umfeld entwickelte der Mensch seine Fähigkeit zur Analogiebildung als ein wesentliches Element kreativen Denkens.

In Abschnitt 2.9.2 wurde die Auffassung von PETERSON und CARSON<sup>393</sup> wiedergegeben, die die erhöhte Kreativität ihrer Probanden zurückführen auf eine geringere latente Inhibition und damit auf einen erhöhten Reiz- und Informationsfluss, der kognitiv verarbeitet werden

<sup>391</sup> vgl. Funke (2000): „Die hier vorgetragenen Überlegungen verdeutlichen nochmals die Notwendigkeit zu einer Perspektive, in der kreatives Denken als Interaktionsprozess zwischen einer kreativen Persönlichkeit und einer kreativitätsförderlichen Umwelt konzipiert wird.“

<sup>392</sup> Vgl. Abschnitt 2.9.2

<sup>393</sup> Vgl. Peterson / Carson (2000), Peterson et al. (2002)

muss. Die stärkere Filterung der Sinneseindrücke führt demnach zu einer geringeren Kreativität. In der Mikrosystemtechnik ist ein weiterer Faktor denkbar, der ähnlich wie die latente Inhibition auf das Kreativitätspotential eines Individuums wirkt. Werden die Sinneseindrücke aufgrund zu geringer Abmessungen technischer Systeme erst gar nicht erzeugt, sollte das nach Meinung des Verfassers dieser Arbeit den gleichen Effekt auf das Kreativitätspotential (z.B. eines Konstrukteurs) haben, wie eine latente Inhibition von Sinneseindrücken, die erzeugte Sinneseindrücke abblocken und einer kognitiven Verarbeitung vorenthalten.

Ein weiteres zentrales Problem liegt darin, dass das Umfeld (insbesondere auch die alltäglichen Erfahrungen) der kreativ tätigen Person in der Mikrosystemtechnik als Quelle für Analogien aufgrund der Skalierung zunehmend unpassende Analogien liefert. In der Mikrowelt verschiebt sich die Gewichtung physikalischer Effekte und Zusammenhänge im Vergleich zur makroskopischen Dimension, vgl. Abschnitt 2.10. Diese veränderten Gewichtungen können zwar auch für die Mikrowelt mit den herkömmlichen Formeln berechnet werden, allerdings bedeutet das nicht, dass sich damit schon ein ebenso „skaliertes Bauchgefühl“ und eine „skalierte Intuition“ einstellen.

Damit fehlt ein wesentlicher Baustein für kreative Prozesse in der Mikrosystemtechnik:

*„Auch die Zusammenhänge, die sich eigentlich relativ leicht aus den physikalischen Gesetzen ableiten lassen, können uns verborgen bleiben, da wir kein Gefühl für kleine Dinge haben. Der Mensch unterscheidet sich von den größten Lebewesen nur um etwa eine Zehnerpotenz, während die kleinsten Lebewesen um ca. 7 Zehnerpotenzen kleiner sind. Unsere Lebensgewohnheiten und unser Gefühl für das physikalische Verhalten von Objekten und Vorgängen orientiert sich am Makromaßstab, uns fehlt daher die Intuition für das Verhalten im Mikromaßstab.“<sup>394</sup>*

Beispiele hierzu können der Entwicklung der „Mikro-Gasturbine“ entnommen werden.<sup>395</sup>

Die Relevanz der Intuition für die Tätigkeit des Mikrosystementwicklers wird deutlich, wenn die klassische Auffassung Redtenbachers<sup>396</sup> mit der Auffassung, Intuition finde vor allem in der Kunst Ausdruck<sup>397</sup>, korreliert wird. Somit erscheint auch die Entwicklung mikrotechnischer Systeme weniger nüchtern und berechenbar, als man es aufgrund ihrer Abstammung von der Mikroelektronik mit ihren Entwurfssprachen, „Design Rules“ und algorithmenbasierten, automatischen Schaltungssynthese zunächst vermuten würde.

Die Skalierung wirkt sich in mikrosystemtechnischen Produktentstehungsprozessen somit in den kreativen Tätigkeiten des Konstrukteurs – also insbesondere während der Ideenfindung

<sup>394</sup>Kasper (2000), S. 25

<sup>395</sup>Vgl. die vorangegangenen Kapitel

<sup>396</sup>...die enge Relation von Technik und Kunst, vgl. Abschnitt 4.3.5

<sup>397</sup>„[Intuition als Form unbewussten Wissens, das] sich aber Ausdruck verschafft in der bildenden Kunst, in der Musik, aber auch täglich in Tausenden kleinen Entscheidungen des Alltagslebens.“ SPIEGEL ONLINE (2007); vgl. auch Abschnitt 2.8.6

und Prinzip- und Gestaltmodellierung bei der Analyse und Synthese – aus.

Damit wird auch deutlich, weshalb die (Mikro-) Bionik als spezielle Form der Analogiebildung in der Mikrosystemtechnik sehr erfolgversprechend ist: Quell- und Zielbereiche für die Analogiebildung liegen bereits in einer ähnlichen Größenordnung vor, damit verringern sich Skalierungseffekte und sind nicht mehr so problematisch, wie bei der Übertragung von Prinzipien aus der Makro- in die Mikrowelt<sup>398</sup> Eine strukturierte Sammlung bereits realisierter Lösungsprinzipien für mikrotechnische Funktionen könnte also ebenso wie die Bionik zur Anregung der Analogiebildung dienen.<sup>399</sup>

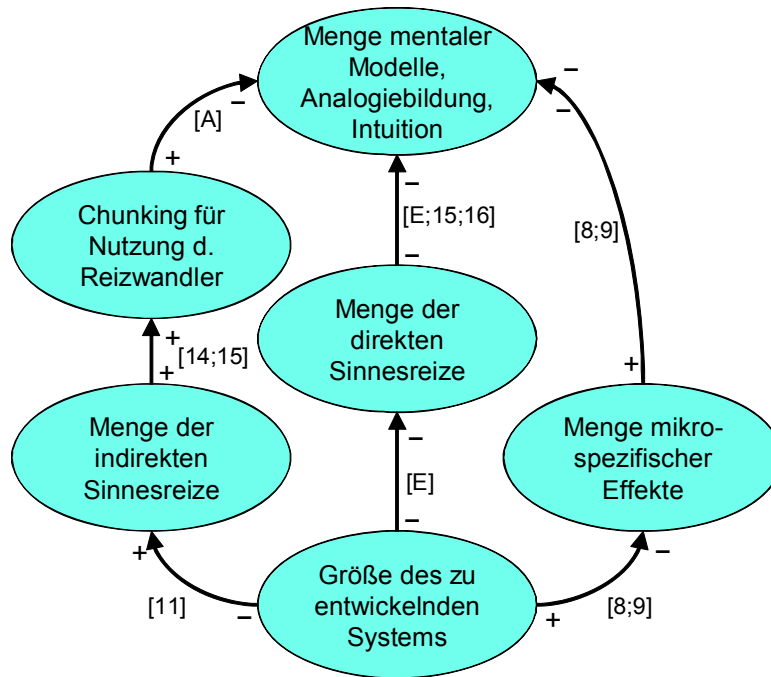
#### 4.4.4 Zwischenfazit

Die für die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik relevante Menge mentaler Modelle und damit die Basis für Intuition und Analogiebildung ist auf drei Wegen abhängig von der geometrischen Größe eines Systems. Einerseits nimmt mit abnehmenden Abmessungen die Menge der direkten Sinnesreize ab, da die menschlichen Sinne nicht mehr in der Lage sind, Sinnesreize aus der Interaktion mit (zu) kleinen Systemen zu erzeugen. Damit nimmt andererseits die Menge an indirekten Sinnesreizen durch Zwischenschaltung von „Reizwandlern“ oder „Reizadaptoren“ in Form von Messgeräten zu. Diese wandeln aufgenommene Effekte aber meistens in visuell erfassbare Reize; die zur Verfügung stehenden menschlichen Sinneskanäle werden also nur sehr einseitig genutzt. Außerdem belegt die Bedienung der oftmals selbst hochkomplexen Messgeräte sowie die Auswertung und Interpretation der erzeugten Messergebnisse einen Teil der zur Verfügung stehenden Chunks, die damit nicht mehr für die Erzeugung eines umfassenden Gesamteindrucks des betrachteten Systems zur Verfügung stehen. Schließlich treten durch abnehmende Abmessungen mikrospezifische Effekte in den Vordergrund, zu denen keine mentalen Modelle bestehen und die hauptsächlich durch Berechnungen abgeschätzt werden können. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 4.13 visualisiert.

Zukünftig müssen, wie auch in Abschnitt 8.2 beschrieben, für eine verbesserte Intuition in der Mikrosystementwicklung zwangsläufig neue Wege zur Konstruktionsunterstützung beschritten werden, die die Bedürfnisse und „Funktionsweisen“ des menschlichen Geistes sehr viel stärker berücksichtigen und damit eine Überwindung der Intuitionsbarriere ermöglichen. Ziel eines jeden Ansatzes zur Verringerung der Intuitionsbarriere muss es dabei sein, die Erfahrbarkeit von Mikrosystemen zu erhöhen und neben der geistigen Auseinandersetzung des Konstrukteurs mit Mikrosystemen auch die körperliche Interaktion zu ermöglichen. Die-

<sup>398</sup>Vgl. auch Qiao (2003), S. 106: „*Lebewesen, als ein hochgradig integriertes biologisches System mit bemerkenswerter Analogie zu technischen Lösungen, bietet der Mikrosystemtechnik mehr Anregung als den technischen Bereichen in normalen Größenordnungen.*“

<sup>399</sup>Die Motivation zum Aufbau des in Kapitel 6 präsentierten Funktionskatalogs resultierte unter anderem auf dieser Überlegung.



**Abbildung 4.13** Die für Intuition und Analogiebildung benötigten mentalen Modelle werden auf drei Wegen durch die Intuitionsbarriere begrenzt. Die Legende zur Abbildung befindet sich in der Fußnote auf Seite 112.

se Überlegungen führen daher z.B. zur Möglichkeit einer mikrospezifischen TRIZ-Box, der Nutzung von immersiver 3D-Reality und Force Feedback, etc. Was darunter zu verstehen ist und weshalb diese Ansätze vom Verfasser dieser Arbeit als sehr interessant in Bezug auf die Überwindung der Intuitionsbarriere bewertet werden, wird ansatzweise im abschließenden Abschnitt 8.2 diskutiert.

## 4.5 Zusammenfassung zu Konstruktionsbarrieren

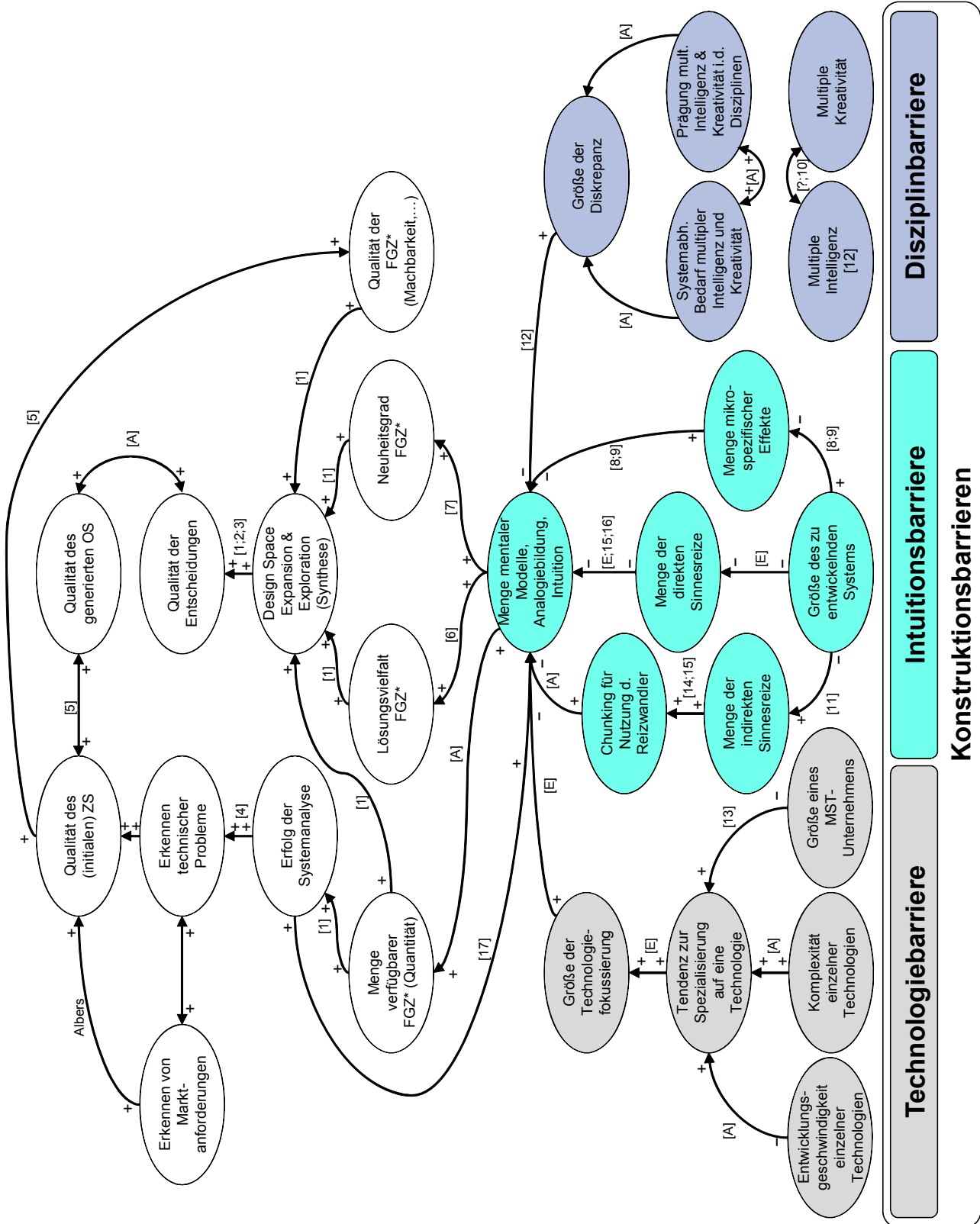
Die in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels hergeleiteten Zusammenhänge in den einzelnen Konstruktionsbarrieren können nun in Abbildung 4.14 zusammengeführt werden.<sup>400</sup> Damit wird die Wirkung der Konstruktionsbarrieren auf die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik veranschaulicht. Das so erhaltene Modell der mikrotechnischen Produktentwicklung entspricht dem „Reference Model“ nach Blessing<sup>401</sup> zur Beschreibung des erkannten IST-Zustandes. Auf dieser Basis wird in Kapitel 6 verdeutlicht, wie die im

<sup>400</sup> Legende:

[X]: Die Aussage wurde in Referenz X veröffentlicht; [A]: Die Aussage basiert auf einer Annahme; [E]: Die Aussage basiert auf Erfahrungen der Akteure; [O]: Die Aussage basiert auf eigenen Untersuchungen; [?]: Ob eine Verbindung existiert, ist nicht bekannt; [1]: Shah et al. (2003); [2]: Dylla (1991); [3]: Lietz (2009); [4]: VDA 4 (2006); [5]: Albers et al. (2012c); [6]: Landau (1971); [7]: Kalogerakis (2010); [8]: Kasper (2000); [9]: Menz (1997); [10]: Getzels / Jackson (1962); [11]: Nachtigall (1998); [12]: Gardner (1985); [13]: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2010); [14]: Miller (1956); [15]: Peterson / Carson (2000); [16]: Peterson et al. (2002); [17]: Duncker (1963).

<sup>401</sup> Vgl. Blessing / Chakrabarti (2009), S. 20 ff.

Rahmen dieser Arbeit entwickelten Maßnahmen die Konstruktionsbarrieren adressieren und die Produktentwicklung beeinflussen.



**Abbildung 4.14** Das Zusammenspiel von Analyse und Synthese in der Produktentwicklung und deren Beeinflussung durch die Konstruktionsbarrieren. Die Legende zur Abbildung befindet sich in der Fußnote auf Seite 112.

# 5 Konstruktionskataloge

Im Rahmenprogramm zur Förderung der Mikrosystemtechnik stellt das BMBF fest, dass die originäre Leistung der Mikrosystemtechnik darin besteht, Einzeltechnologien und Disziplinen miteinander zu verknüpfen und damit Innovationen<sup>402</sup> erst zu ermöglichen.<sup>403</sup>

Dieser Verknüpfung stehen aber die im vorangegangenen Kapitel diskutierten Konstruktionsbarrieren entgegen. Zusätzlich ist das hierzu benötigte Expertenwissen „[...] *zum Teil sehr firmenspezifisch, wenig aufbereitet und nicht allgemein zugänglich* [...]“<sup>404</sup> Weiterhin wird das Wissen in der Mikrosystemtechnik zwar konstant stark erweitert, ist aber oft personengebunden und nur implizit verfügbar<sup>405</sup>. Die Fluktuation von Mitarbeitern und damit die Diffusion von Wissen wird aufgrund der durch Forschungsinstitutionen geprägten Disziplin (Mikrosystemtechnik) vom Verfasser dieser Arbeit als relativ hoch eingeschätzt.<sup>406</sup> Der Bedarf nach Wissensmanagement ist in der Mikrosystemtechnik im Gegensatz zu anderen Branchen also besonders hoch. In diesem Zusammenhang existiert die Überzeugung, dass in der Produktentwicklung das Rad nicht immer wieder auf's Neue erfunden, sondern bereits bestehende Lösungen in gewissen Grenzen übernommen werden sollen.<sup>407</sup>

Watty beschreibt Konstruktionsregeln oder Konstruktionskataloge als Möglichkeiten zum Wissensmanagement in der Mikrosystemtechnik, die „[...] *Informationen in strukturierter Form und mit der Möglichkeit des schnellen Zugriffs bei Bedarf*“<sup>408</sup> aufnehmen und zur Verfügung stellen können. Während (die in der Mikrosystemtechnik etablierten und häufig genutzten) Konstruktionsregeln<sup>409</sup> den Konstrukteur aber insbesondere darauf hinweisen, was an einer bereits (implizit oder explizit) vorhandenen Gestalt nicht umsetzbar ist (im

---

<sup>402</sup>Vgl. Abschnitt 2.2.1

<sup>403</sup>Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 13

<sup>404</sup>Watty (2006), S. 29

<sup>405</sup>Vgl. Albers et al. (2011b)

<sup>406</sup>Dieses zeigte sich z.B. auch im Rahmen des SFB 499, vgl. Abschnitt 2.7.2; vgl. auch Watty (2006), S. 29: „*Das Wissen in der Mikrosystemtechnik nimmt zwar ständig stark zu, diffundiert aber teilweise und ist damit oft nicht verfügbar, wenn es benötigt wird. [...] Der Entwickler ist aber auf schnell verfügbares und ständig aktualisiertes Wissen angewiesen, das z. B. in Form von Datenbanken verfügbar ist.*“

<sup>407</sup>„*Vorhandenes und als derzeitig 'richtig' akzeptiertes Wissen muss man verwerten. Man darf und kann nicht nur, sondern muss unbedingt vorhandenes Wissen benutzen. Besonders gilt das für das Wissen der Nachbarwissenschaften. Bewusster Wissensverzicht ist für den Forschenden eine Todsünde.*“ Vgl. Nachtigall (2010), S. 57.

<sup>408</sup>Watty (2006), S.45

<sup>409</sup>Das Konzept der Konstruktionsregeln, wie es in der Mikrosystemtechnik genutzt wird, ist orientiert den Design Rules der Mikroelektronik. Diese sind in der MST zwar hilfreich, wenn ein Gestaltvorschlag auf seine Umsetzbarkeit hin überprüft werden soll. Zur Unterstützung der kreativen Synthese von Gestaltvorschlägen helfen sie aber nicht.

Sinne der Restriktionsüberprüfung), geben Konstruktionskataloge<sup>410</sup> dem Konstrukteur in der kreativen Gestaltsynthese Hinweise auf Lösungsansätze, die prinzipiell möglich sein könnten.

Zur Rolle von Konstruktionskatalogen im Rahmen seiner Tätigkeit als Konstrukteur in der Industrie bemerkt BIRKHOFFER, dass sie einen wesentlichen Einfluss auf seine Karriere ausübten:

*„Roth’s (1994a, 1994b) work in Germany had a substantial career influence. Many times during industrial work, the seemingly superficial scanning of a design catalogue was a catalyst for a good solution idea. Thus, an important addition to design practice was established: the best detection and use of solutions significantly affect the efficiency and effectiveness of the design work. This intention contains the presentation of solutions in classical design catalogues as well as in current internet media.“<sup>411</sup>*

Im Folgenden soll also die Möglichkeit zur Nutzung von Konstruktionskatalogen bei der Überwindung der Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik überprüft werden.

## 5.1 Die Grundidee von Konstruktionskatalogen

Konstruktionskataloge sind im Kern Sammlungen konstruktionsrelevanten Wissens, die dem Systemkonstrukteur einen Überblick über schon für bestimmte Probleme vorhandene Lösungen verschaffen und ihn bei der Auswahl einer Lösung für einen bestimmten Anwendungsfall unterstützen sollen. Ziel dabei ist es, in synthetisierenden Schritten des Produktentwicklungsprozesses auf bekannte und bewährte Lösungen zurückzugreifen und diese nicht immer wieder „neu“ zu entwickeln. FUNKE<sup>412</sup> listet in Anlehnung an STERNBERG<sup>413</sup> Erfolgsfaktoren für die Erhöhung kreativen Outputs auf. Eine dieser Empfehlungen lautet, dass man *„[...] soviel Wissen über [seinen] Bereich wie möglich“* sammeln soll, um zu verhindern, *„[...] dass das Rad zum 100. Mal erfunden wird“*. Aus kognitionspsychologischer Sicht sind das Vorhandensein relevanter Fachkenntnis sowie ein Repertoire an relevanten Lösungselementen Grundvoraussetzungen für Kreativität und die Möglichkeit, im Sinne modularer oder architektureller Innovationen<sup>414</sup> Lösungselemente neu zu kombinieren.<sup>415</sup> In diesem Kontext können Konstruktionskataloge als Sammlung entsprechender Lösungselemente die Kreativität unterstützen.

<sup>410</sup>Konstruktionskataloge stellen eine etablierte Möglichkeit zur Speicherung konstruktionsrelevanten Wissens dar. Ursprünglich im Maschinenbau entwickelt, werden sie inzwischen in vielen anderen gestaltenden technischen Disziplinen eingesetzt.

<sup>411</sup>Birkhofer (2011)

<sup>412</sup>vgl. Funke (2000)

<sup>413</sup>vgl. Sternberg (1995), S. 363 f.

<sup>414</sup>Vgl. Abschnitt 2.2

<sup>415</sup>Vgl. Deigendesch (2009), S. 60



### 5.1.1 Klassierung von Konstruktionskatalogen

Es werden drei Klassen von Konstruktionskatalogen unterschieden. *Objektkataloge* werden genutzt, um allgemeines Konstruktionswissen ohne Bezug zu konkreten technischen Funktionen oder Aufgaben zu besitzen. Diese grundlegenden Sachverhalte sind „[...] insbesondere *physikalischer, geometrischer, technologischer und stoffkundlicher Natur*“<sup>416</sup>.

*Operationskataloge* hingegen speichern Prozesswissen, das für die Durchführung methodischen Konstruierens relevant ist. Damit meint Roth insbesondere „[...] *die Regeln, welche zur Erzeugung verschiedener Funktionsstrukturen nötig sind, die Regeln nach welchen die Elemente eines bestimmten produkt darstellenden Modells zu verknüpfen sind*“<sup>417</sup>.

*Lösungskataloge* schließlich korrelieren Aufgaben mit Funktionen, Funktionen mit Effekten, Effekte mit Effektträgern, Effektträger mit Konturteilen und schließlich Konturteile mit Herstellverfahren<sup>418</sup>. Der Hauptteil eines Lösungskatalogs enthält Ansätze oder Realisierungsmöglichkeiten für typische Problemlösungsprozesse im Konstruktionsprozess.

### 5.1.2 Aufbau von Konstruktionskatalogen

Die wesentlichen Anforderungen und Bedingungen an Konstruktionskataloge wurden wie folgt von ROTH<sup>419</sup> formuliert:

- *„Schnellen Informationszugriff und bequeme Handhabung ermöglichen, Gültigkeit für einen großen Benutzerkreis haben,*
- *dem Konstruktionsablauf angepaßt sein, Widerspruchsfreiheit in sich und untereinander aufweisen, konstruktionsmethodische Gesichtspunkte und Verfahren berücksichtigen, Vollständigkeit innerhalb gesetzter Grenzen gewährleisten,*
- *erweiterungsfähig, systembeständig sowie im Detail änderbar sein und die Gesichtspunkte ihrer Gliederung erkennen lassen.“*

PAHL, BEITZ<sup>420</sup> und EHRENSPIEL<sup>421</sup> stellen die folgenden, prinzipiell ähnlichen Anforderungen an Konstruktionskataloge:

- Schneller, aufgabenorientierter Zugriff zu den gesammelten Lösungen bzw. Daten
- Weitgehende Vollständigkeit des gesammelten Lösungsspektrums
- Möglichst weitgehend branchen- und firmenunabhängig, um breit einsetzbar zu sein

<sup>416</sup>Roth (1982), S. 46 f.

<sup>417</sup>Roth (1982), S. 47

<sup>418</sup>vgl. Roth (1982), S. 47

<sup>419</sup>Roth (1982), S. 40 in Anlehnung an VDI2222

<sup>420</sup>Vgl. Pahl et al. (2005), S. 152

<sup>421</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2003), S. 393

Die Berücksichtigung und Erfüllung dieser Anforderungen führte zum typischen Aufbau von Konstruktionskatalogen aus Gliederungsteil, Hauptteil und Zugriffsteil. Der **Gliederungsteil** dient dazu, die Inhalte des Katalogs logisch einwandfrei, widerspruchsfrei und nachprüfbar zu unterteilen.<sup>422</sup> Dadurch wird einerseits die Navigation des Anwenders durch den Katalog geleitet, andererseits ermöglicht die Klassierung durch den Gliederungsteil dem Ersteller auch die Überprüfung des Katalogs auf Vollständigkeit.

Der **Hauptteil** enthält wie zuvor erwähnt den eigentlichen Inhalt des Katalogs, also physikalische Effekte, Wirkprinzipien, prinzipielle Lösungen für komplexe Aufgabenstellungen, Maschinenelemente, Normteile, Werkstoffe, Zukaufteile, etc.<sup>423</sup> Kennzeichnend für den Hauptteil und somit für den Konstruktionskatalog als Ganzes ist sein Konkretisierungsgrad. Dieser kennzeichnet die Breite und die Tiefe der im Hauptteil enthaltenen Lösungsbeschreibungen. Ein breit aufgestellter Katalog liefert zwar einen guten Überblick über das zur Verfügung stehende Lösungsspektrum, die dargestellten Lösungen bedürfen aber zunächst einer Weiterentwicklung durch den Konstrukteur, um genutzt werden zu können. Das Lösungsspektrum eines in die Tiefe gehenden Katalogs ist demgegenüber zwar unmittelbarer nutzbar, allerdings entsprechend fokussierter und dadurch eingeschränkter. Um die jeweiligen Vorteile zu kombinieren und die Nachteile zu eliminieren, schlägt ROTH die Unterteilung eines Konstruktionskatalogs in Übersichts- und Detailkataloge vor.<sup>424</sup>

Der **Zugriffsteil** schließlich dient dazu, den Inhalt des Hauptteils weiter zu spezifizieren und die Auswahl einer situationsangepassten Lösung zu unterstützen. Aus der Fülle an präsentierten Lösungen sollen für den jeweiligen Anwendungsfall besonders vielversprechende Lösungen schnell identifiziert und unpassende Lösungen ausgesondert werden. Der Zugriffsteil ist oft branchenabhängig, da je nach Branche oft unterschiedliche Anforderungen an Lösungen erhoben werden und die Wichtigkeit von Lösungsmerkmalen variiert. Die Grundstruktur eines Konstruktionskatalogs ist unabhängig vom Zugriffsteil und wird von Gliederungs- und Hauptteil bestimmt. Daher können Zugriffsteile einfach und unproblematisch verändert und erweitert werden.<sup>425</sup>

### 5.1.3 Äußere Form

Grundlegende Forschungsarbeiten zu Konstruktionskatalogen und zu ihrer Einbindung in den Konstruktionsprozess fanden vor allem in den 70er und 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts durch ROTH<sup>426</sup> statt. Gleichzeitig wurden Konstruktionskataloge für verschiedenste Anwendungen entwickelt. Diese Kataloge liegen typischerweise in einer tabellarischen Form

---

<sup>422</sup>Vgl. Roth (1982), S. 40

<sup>423</sup>Vgl. Schweinberger (2000)

<sup>424</sup>Vgl. Roth (1982), S. 45 f.

<sup>425</sup>Vgl. Roth (1982), S. 42 ff.

<sup>426</sup>Vgl. Roth (1982)

und in einem Format vor, das es erlaubt, den Kataloginhalt auf DIN A4- oder DIN A3-Seiten zu drucken und zu vervielfältigen.

Aktuell entwickelte Konstruktionskataloge<sup>427</sup> behalten zwar die tabellarische Form, werden aber vor allem computerunterstützt (v.a. über das Internet) bereitgestellt. Die Notwendigkeit des Ausdrucks/Kopierens zur Vervielfältigung und damit die Orientierung an gängigen Papierformaten verliert hier erkennbar an Bedeutung. Insbesondere die schon zuvor von ROTH beschriebene prinzipielle Flexibilität des Zugriffsteils wird durch heutige EDV-gestützte Tools einfach umsetzbar und in aktuellen Konstruktionskatalogen deutlich anhand der oft sehr umfangreichen Zugriffsteile.

In Abbildung 5.1 ist ein Konstruktionskatalog für die Entwicklung von Hydraulikpumpen dargestellt.<sup>428</sup> In den Spalten des Katalogs von links nach rechts erfolgt die Aufteilung des Katalogs in Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil.

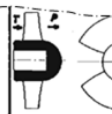

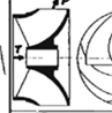
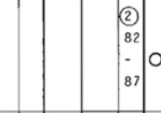
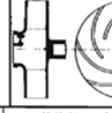
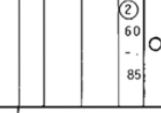
GLIEDERUNGSTEIL								HAUPTTEIL			ZUGRIFFSTEIL											ANHANG																																									
Wirkprinzip	Form des Verdrängerraums	Art der Verdrängerbewegung	Erzeugung der Verdrängerbewegung	Abdichtung des Verdrängerraums: Sperrelement (Sperrelement)	ax. Rad. ax.	Steuerung	Exemplarische Darstellung	LÖSUNGEN			bevorzugter Einsatzbereich ①					bez. Größen ①			Verhalten			Kostenbewertung für P <sub>n</sub>	Bemerkungen																																								
								benutzte Zu- und Abfuhr	Abfuhr	Abfuhr	P <sub>n</sub>	P <sub>n</sub>	Q <sub>n</sub>	V <sub>th</sub>	n <sub>n</sub>	φ	T	p <sub>n</sub>	p <sub>n</sub>	η <sub>max</sub>	reversierbar			verstellbar	Pulsation	erf. Anschlag	Geräusch	Medium	Typenvielfalt																																		
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	1																															
TP																											1																																				
dynamisch p = f(n <sup>2</sup> )								 34 Kreisel-pumpe, axial			② 0,1 3300 - - ② nq = 160 0,81 7k 10 <sup>5</sup> 400					② -90						X																																									
								 35 Kreisel-pumpe, halbaxial			② 0,3 330 - - ② nq = 35 3 67k 10 <sup>6</sup> 60					② 82						X																																									
								 36 Kreisel-pumpe, radial			② 0,5 30 - - ② nq = 10 30 9000 25000 35					② 60						X																																									
<b>Benutzte Abkürzungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>m Masse der Pumpe</li> <li>M<sub>n</sub> Nennmoment</li> <li>n<sub>n</sub> Nennzahl</li> <li>n<sub>sp</sub> spez. Schnellläufigkeit</li> <li>n<sub>q</sub> = <math>\frac{q_n}{Q_n}</math></li> <li>P<sub>n</sub> Nennleistung</li> <li>p<sub>n</sub> Nenndruck</li> <li>Q<sub>n</sub> Nennvolumenstrom</li> <li>T Temperatur</li> <li>V Volumen der Pumpe</li> <li>(außen ablesend)</li> </ul>								<b>V<sub>th</sub> theoretisches Fördervolumen</b> q <sub>g</sub> Gesamtwirkungsgrad q <sub>hyd.</sub> hydr.-mech. Wirkgr. q <sub>vol</sub> volumet. Wirkgr. v kinemat. Viskosität								<b>zu Abdichtung d. Verdrängerraums</b> = konst. Dichtspalt F= Spaltbreite abhängig von Anpfordruck, Feder oder Fließkraft - berührende Dichtung - berührende Dichtung mit Dichtelement - Dichtung (keine Relativbewegung) - wälzende Dichtung								<b>zu Zu- u. Abfuhr</b> 0 - Zufuhr 1 - Abfuhr 2 - Zufuhr + Abfuhr 3 - Zufuhr + Abfuhr 4 - Zufuhr + Abfuhr								<b>zu reversierbar</b> ● ohne Umbau rev. ○ nach Umbau rev. ⦿ nicht rev. ⊗ drehrichtungsunabhängig in glet. Richtung fördern <b>zu Pulsation</b> ● gleichförmig ○ schwach schwankend ⊗ schwankend ○ stark schwankend								<b>zu verstellbar</b> ● -stufenlos verstellbar von +V <sub>th1</sub> bis -V <sub>th2</sub> ○ -stufenlos bis Nulllage V <sub>th1</sub> bis 0 ⊗ -stufenlos von +V <sub>th1</sub> bis -V <sub>th2</sub> ○ -in Stufen verstellbar V <sub>th1</sub> , V <sub>th2</sub> , ... ⊗ nicht verstellbar <b>zu erf. Anschlag</b> <1 bar - selbstausgend								<b>zu Geräuschverhalten</b> ● -gering (1-25dBA) ○ -mäßig (25-35dBA) ⊗ -groß (35-45dBA) ⊗ -sehr groß (>45dBA) <b>zu Typenvielfalt</b> X - Mineralöl S - schwer entflammare Flüssigkeiten, wie HFA, -B, -C, -D bzw. HSA, -B, -C, -D								<b>zu Kostenbewertung</b> [ 5 ] Mittelwert [ 1 ] Maximalwert [ 2 ] Minimalwert (Abnahme von 10 Stück)							
THD								KONSTRUKTIONSKATALOG: "HYDRAULIKPUMPEN" Teil 3																			MuM 11.83																																				

Abbildung 5.1 Konstruktionskatalog für die Entwicklung von Hydraulikpumpen nach Schneider (1986), S. 130 f.

<sup>427</sup>Vgl. z.B. Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig (1999)

<sup>428</sup>Vgl. Schneider (1986), S. 156

## 5.2 Anwendung in der Produktentwicklung

Das methodische Konstruieren mit Konstruktionskatalogen wird seit Jahrzehnten erforscht. Dabei wurden Konstruktionskataloge sowohl für verschiedene Disziplinen, die sich mit der Gestaltung technischer Produkte befassen (z.B. Maschinenbau, Elektrotechnik, Feinwerktechnik, etc.) sowie für verschiedene technische Systeme (z.B. Antriebe, Anzeigen, Energiespeicher, etc.) spezifische Kataloge aufgebaut.<sup>429</sup> Konstruktionskataloge sollen den Konstrukteur dabei umfassend während der Durchführung der synthetisierenden Phasen des Produktentstehungsprozesses unterstützen.

Die Forschungsarbeiten fanden ihren Höhepunkt in Bestrebungen, den Konstruktionsprozess durch algorithmisierbare Auswahlverfahren zu (teil-) automatisieren. Allerdings war die Realisierung dieser „Konstruktionsautomaten“ im Maschinenbau bislang nicht erfolgreich (im Gegensatz zur Mikroelektronik, vgl. Abschnitt 2.6.2).

Die geometrische Skalierung von Systemen führt zu unterschiedlichen Gewichtungen der für die Funktionserfüllung genutzten Effekte, vgl. Abschnitt 2.10. Daher wurden schon vor der Entwicklung der Mikrosystemtechnik spezielle feinwerktechnische Lösungsansätze entwickelt und in entsprechenden Konstruktionskatalogen festgehalten:

*„Die besonderen Anforderungen z.B. nach Präzision, geringen Abmessungen, geringem Spiel, Stoßsicherheit, Schwingungsdämpfung, sowie der überwiegende Einsatz der Feingeräte zur Signalverarbeitung, führten zu einem speziellen feinwerktechnischen Lösungsspektrum, welches sich vielfach deutlich von entsprechenden Konstruktionen anderer Industriezweige (z.B. Maschinenbau) unterscheidet (vgl. RABE/76 ; UNTERBERGER/102 ; SCHREYER/98). Aus der Vielzahl aller funktioneller Lösungsmöglichkeiten für ein Problem ist nur eine begrenzte Anzahl für feinwerktechnische Lösungen geeignet.“<sup>430</sup>*

## 5.3 Konstruktionskataloge in der Mikrosystemtechnik

In der Mikrosystemtechnik gibt es bereits erste Ansätze zum Aufbau mikrospezifischer Konstruktionskataloge, allerdings implizieren diese die in Kapitel 4 kritisierte Technologie- oder Disziplinbarriere.

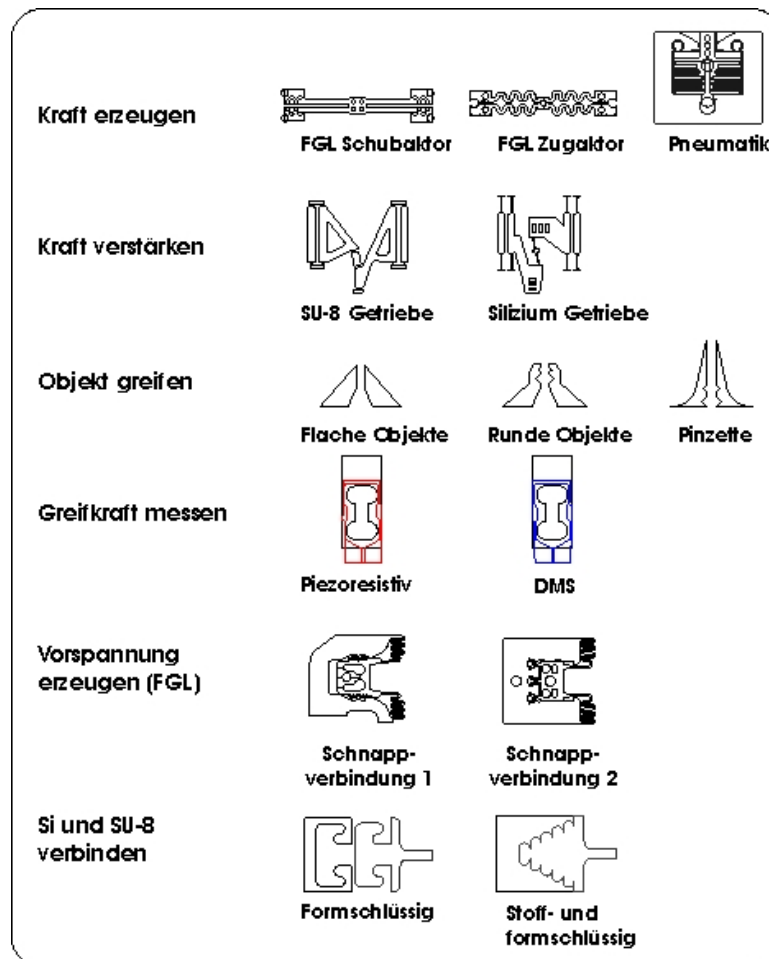
Am Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig wurde ein „Baukasten zur Konstruktion aktiver Mikrosysteme“ entwickelt, der zu gewissen Subfunktionen mögliche Lösungen in Form von „Bausteinen“ zur Verfügung stellt und somit von der Grundidee ähnlich zu einem Konstruktionskatalog ist.<sup>431</sup> Diese Bausteine bestehen aus einem

<sup>429</sup>Vgl. Roth (1982); Neumann et al. (1978); Giessner (1974); Völckers (1977); Schneider (1986)

<sup>430</sup>Völckers (1977)

<sup>431</sup>Vgl. Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig (2003)

parametrisierten Geometriemodell und geeigneten Prozessfolgen, die für ihre Herstellung eingehalten werden müssen. Nachdem das Geometriemodell sowie die zu nutzenden Materialien festgelegt sind, wird der Gesamtprozess geplant. Dadurch lassen sich System und Produktionsprozess konsistent planen.<sup>432</sup> Ein Ausschnitt des Baukastens ist in Abbildung 5.2 dargestellt, das prinzipielle Vorgehen in der Mikrosystementwicklung unter Einbeziehung des Baukastens zeigt Abbildung 5.3.



**Abbildung 5.2** Auswahl möglicher Bausteine für die Realisierung von typischen Funktionen eines Mikrogreifers. Abbildung entnommen aus Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig (2003).

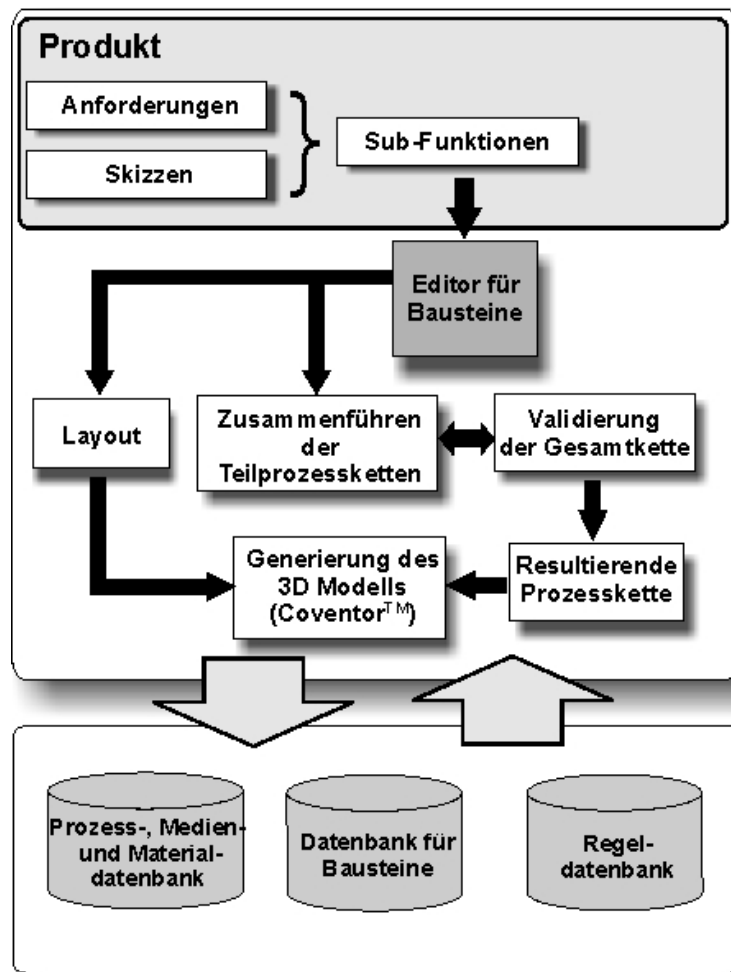
Ein weiteres Beispiel für einen mikrospezifischen Konstruktionskatalog liefert KALLENBACH für die Entwicklung von Mikroaktoren.<sup>433</sup>

Einen weiteren Konstruktionskatalog für aktive Mikrosysteme, der entsprechend dem klassischen Aufbau von Konstruktionskatalogen gegliedert und aufgebaut ist, wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts GINA entwickelt.<sup>434</sup> Dieser Konstruktionskatalog beinhaltet Subkataloge für die Entwicklung von Mikrogreifern, Mikroaktoren, Spulen, Flussführungen und

<sup>432</sup>Vgl. Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig (2003)

<sup>433</sup>Vgl. KALLENBACH94, S. 78 zitiert in Watty (2006), S. 106

<sup>434</sup>Vgl. Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig (1999)



**Abbildung 5.3** Arbeitsfluss im Baukastensystem. Abbildung entnommen aus Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig (2003).

Linearführungen. Ein Ausschnitt des Konstruktionskatalogs zu Mikrogreifern ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

INA		Konstruktionskatalog - Greifer			Home										
Nr. ord	Greifprinzip	Physikalischer Effekt	Lösung	Prinzipskizze	Überschlägige Formel für haltende Kraft	Anzahl der Greifflächen	mögl. Greiferabmessung	Reinraumtauglichkeit	Vakuumtauglichkeit	Lösen des Bauteils	Zentrierfähigkeit	Flexibilität	Mech. Bauteilbelastung	Literatur für alle Kataloge	Anmerkungen zur Reinraumtauglichkeit
970 0	Greifen mit Kraftschluss	Elektrostatik	Elektrostatischer Greifer		$F_H = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U^2 A}{2 d^2 (d + c)}$ <p>U - Spannung                      A - durchströmte Fläche  <math>\epsilon_0</math> - elektrische Feldkonstante  <math>\epsilon_r</math> - Dielektrizitätszahl                      d - Abstand                      c - Dicke des Greifobjektes (Gleit- und Isolierd)</p>	1	klein			schlecht	eingeschränkt	eingeschränkt	gering		Staubanziehend
971 0	Greifen mit Kraftschluss	Magnetismus	Magnetischer Greifer		$F_H = \frac{A \times B^2}{2 \mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right)$ <p>B - magnetische Flussdichte                      A - durchströmte Fläche  <math>\mu_0</math> - magnetische Feldkonstante  <math>\mu_r</math> - Permeabilitätszahl</p>	1	klein			schlecht	eingeschränkt	eingeschränkt	gering		
972 0	Greifen mit Kraftschluss	Unterdruck	Sauggreifer		$F_H = A \cdot (P_{atm} - P_{U})$ <p><math>P_{atm}</math> - atmosphärischer Druck  <math>P_{U}</math> - Unterdruck                      A - wirksame Fläche</p>	1	klein			sehr gut	eingeschränkt	eingeschränkt	gering		
973 0	Greifen mit Kraftschluss	Reibung	Mechanischer Greifer		$F_H = \mu \cdot N$ <p><math>\mu</math> - Haftreibungsbeiwert                      N - Normalkraft</p>	>1	normal			gut	gut	gut	hoch		
974 0	Greifen mit Formschluss	Formschluss	Abformgreifer		$F_H = g \cdot M$ <p>g - Erdbeschleunigung                      M - Masse</p>	>1	groß			gut	gut	sehr gut	sehr gering		

Abbildung 5.4 Konstruktionskatalog zu Mikrogreifern. Abbildung zusammengesetzt aus Screenshots von Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig (1999).





# 6 Ein Funktionskatalog für die Mikrosystemtechnik

## 6.1 Vorüberlegungen

Als Konstruktionskataloge werden nach ROTH nur solche Kataloge bezeichnet, die einen Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil besitzen.<sup>435</sup> Da in dem hier entwickelten Katalog neuartige Werkzeuge<sup>436</sup> anstelle von (zumeist) papierbasierten Listen eingesetzt werden, wie sie zu Zeiten ROTHS noch Stand der Technik waren, sind diese Forderungen formal nicht erfüllt. Weiterhin ist die Intention, die mit dem Katalog verfolgt wird, umfassender als bei herkömmlichen Konstruktionskatalogen, da nicht nur die Synthese, sondern auch die Analyse unterstützt werden soll. Der Fokus des Katalogs liegt vor allem auf der eng verknüpften Darstellung von Funktions-Gestaltzusammenhängen der Mikrosystemtechnik. Aus diesen Gründen soll der entwickelte Katalog zur begrifflichen Unterscheidung von Konstruktionskatalogen nach ROTH im weiteren als *Funktionskatalog* bezeichnet werden.

### 6.1.1 Überwindung der Konstruktionsbarrieren durch einen Funktionskatalog

Die Vorteile der Verwendung von allgemeingültigen Konstruktionskatalogen wurden schon durch Roth<sup>437</sup> ausführlich diskutiert und von Völckers<sup>438</sup> wie folgt zusammengefasst:

- *„Verminderung von Entwicklungszeiten*
- *Verminderung von Entwicklungskosten*
- *Förderung des methodischen Konstruierens*
- *systematische, zufallsunabhängige, gezielte Abdeckung des Lösungsfeldes (auch durch den weniger erfahrenen Konstrukteur)*

---

<sup>435</sup>Vgl. Roth (1982), S.40

<sup>436</sup>Semantic Wiki, PDM-Datenbank Windchill, Geometrische Ähnlichkeitssuche „CADENAS GEOsearch“

<sup>437</sup>Vgl. Roth (1982)

<sup>438</sup>Völckers (1977)

- *Vermeidung von Irrtümern, Risiken, Doppelarbeit*
- *Verbesserung der Produkte in qualitativer und/oder funktionaler Hinsicht“*

Ein Funktionskatalog scheint aufgrund dieser Eigenschaften ein geeignetes Mittel, um die diskutierten Konstruktionsbarrieren zu überwinden. Durch einen geeignet gestalteten Gliederungsteil könnte die Technologiefokussiertheit in der Produktentwicklung aufgebrochen werden. Ausgehend von einer gewünschten Funktionalität könnte technologieübergreifend auf unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten zugegriffen werden. Zwar wird der Konstrukteur unter Berücksichtigung entsprechender Restriktionen auch dann wieder eine Möglichkeit auswählen und sich im Folgenden darauf fokussieren, diese Auswahl geschieht unter Kenntnis alternativer Lösungsmöglichkeiten aber bewusst und nicht schon zu Beginn eines Entwicklungsprojekts mit der Festlegung der zu nutzenden Technologie. In gleicher Weise könnte die Disziplinbarriere überwunden werden. Durch die Bereitstellung disziplinübergreifenden Wissens in dem Funktionskatalog könnte ein Mikrosystemtechnik-Konstrukteur leichter die Funktions-Gestaltzusammenhänge anderer Disziplinen verstehen und selbst in seiner Konstruktion berücksichtigen und einsetzen. Die Intuitionsbarriere schließlich könnte durch die Darstellung bereits erfolgreich realisierter Funktions-Gestaltzusammenhänge, die im weiteren als Analogiequelle nutzbar sind, reduziert werden. Ähnlich wie in der Mikrobionik<sup>439</sup> lägen die Analogiequellen dieses Katalogs schon in der richtigen Größenordnung vor und könnten direkt genutzt werden, da die zugrunde liegenden Effekte keiner Skalierung mehr unterlägen und auch im Analogieziel in gleicher Weise nutzbar wären (im Gegensatz zu Analogiequellen, die der Makrowelt entstammen). Das Problem der Nicht-Erfahrbarkeit der Mikrowelt und ihrer Effekte durch den Menschen bliebe durch den Funktionskatalog aber nach wie vor ungelöst.

Ein wichtiges Kriterium, das kreatives Denken fördert, ist Entscheidungsfreiheit.<sup>440</sup> Hier ist natürlich in erster Linie die Entscheidungsfreiheit gemeint, eigenverantwortlich Entscheidungen treffen zu dürfen und nicht (ggf. wider besseres Wissen) die Entscheidungen anderer mit all ihren Konsequenzen umsetzen zu müssen. Hat man die Entscheidung zuvor selbst gefällt, wird man versuchen, sie auch gegen Widerstände durchzusetzen. Ähnlich kann man die Einschränkung der Entscheidungsfreiheit in Entwicklungsprojekten durch technologische oder disziplinspezifische Restriktionen auffassen. Wenn diese Restriktionen nicht bewusst gewählt wurden, sondern wie bei der Technologie- und Disziplinbarriere kognitive Limitierungen darstellen, kann die Verringerung dieser Barrieren zu erhöhter Entscheidungsfreiheit und damit zur Förderung kreativen Denkens führen.

---

<sup>439</sup>Vgl. Nachtigall (1998), S. 113 f.

<sup>440</sup>Vgl. Amabile (1983)

## 6.1.2 Beeinflussung der Produktentwicklung

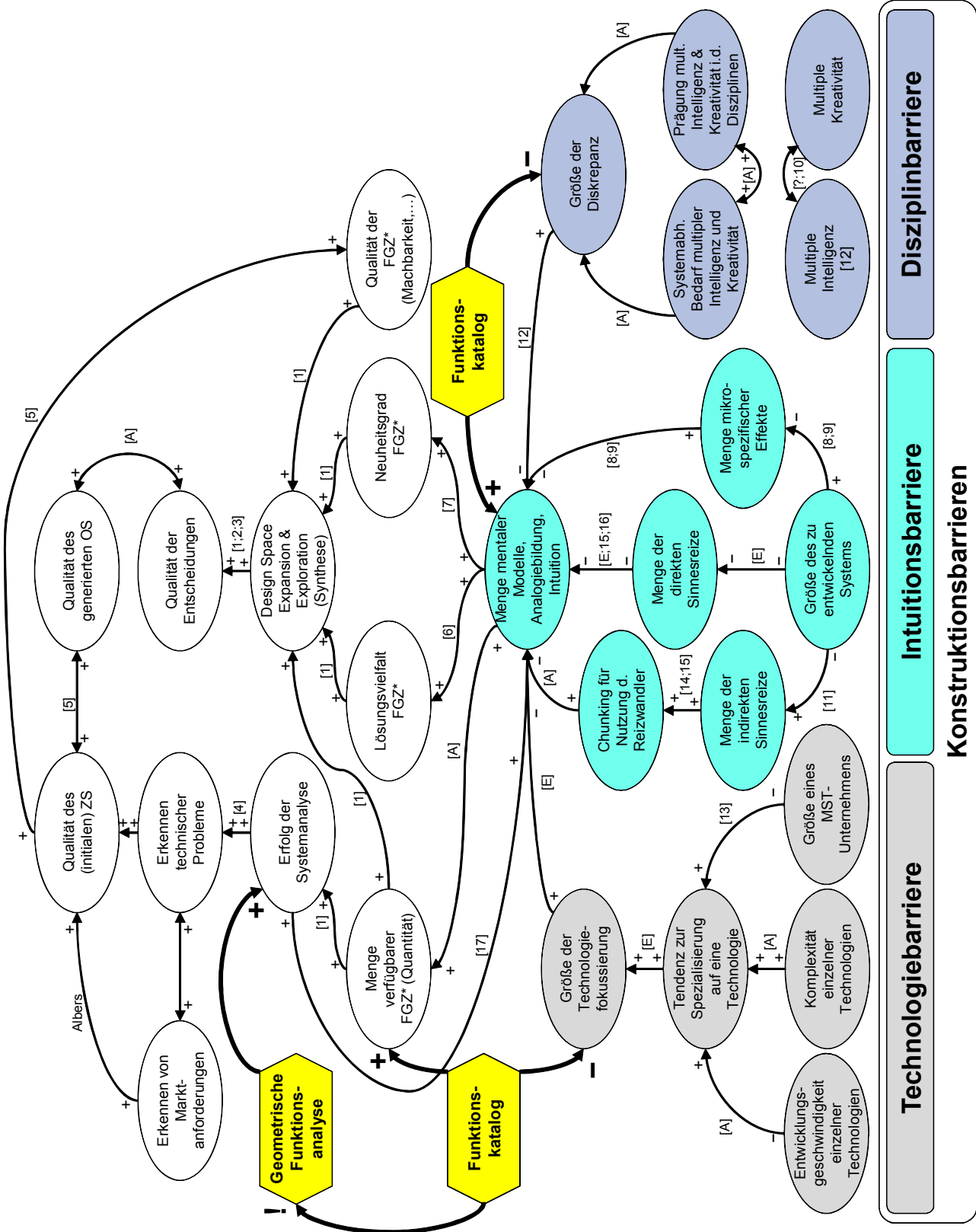
In Abschnitt 4.5 wurde dargestellt, wie die Konstruktionsbarrieren mit der Produktentwicklung zusammenhängen. Wird der hier gewählte Ansatz des Funktionskatalogs und der geometrischen Funktionsanalyse in Abbildung 6.1 übertragen, erkennt man, wie diese Ansätze die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik beeinflussen. Durch den Funktionskatalog können einerseits disziplingepägte Denkweisen und Funktions-Gestaltzusammenhänge ergänzt und somit die Disziplinbarriere verringert werden. Andererseits ermöglicht der Funktionskatalog bei der Systemsynthese die Einbeziehung von Funktions-Gestaltzusammenhängen benachbarter Produktionstechnologien und damit eine Reduktion der Technologiebarriere. Zwar bieten die Inhalte des Funktionskatalogs auch die Möglichkeit zur Anregung der Kreativität bei der Lösungssuche durch Intuition und Analogiebildung. Allerdings werden die der Intuitionsbarriere zugrunde liegenden Kernprobleme durch den Funktionskatalog nicht gelöst.

Die geometrische Funktionsanalyse baut auf dem Funktionskatalog auf und nutzt die dort beschriebenen Funktions-Gestaltzusammenhänge, um unbekannte Strukturen und Systeme analysieren zu können. Damit kann die Analyse dieser Zusammenhänge teilweise automatisiert und die dort wirkenden Konstruktionsbarrieren in Abhängigkeit der Größe der Datenbank überwunden werden.

## 6.1.3 Freiheit in äußerer Form

Der Funktionskatalog muss, um den Konstrukteur nicht nur in synthetisierenden, sondern auch in analysierenden Schritten unterstützen zu können, einen erweiterten Zugriffsteil erhalten.<sup>441</sup> Dieses erfordert ein alternatives Konzept für die Speicherung der Kataloginhalte und vor allem den Verzicht auf die bislang genutzte äußere Form. Hierbei bietet sich die Möglichkeit, Nachteile herkömmlicher Konstruktionskataloge, die durch die äußere Form impliziert werden, aufzulösen. Die herkömmliche, papierbasierte und listenförmige Form von Konstruktionskatalogen wird insbesondere bei der Generierung von mehrdimensionalen Gliederungsteilen schnell relativ aufwändig und führt dazu, dass die Zugriffsmerkmale fehlen. Weiterhin ist in der Form die Ergänzung der Kataloge durch weitere Teillösungen oder ihre Umstrukturierung sehr aufwändig. So bietet die zum Datenmanagement im Folgenden ausgewählte Nutzung eines Wiki, vgl. Abschnitt 6.4.1 die Möglichkeit, durch die Vergabe von sog. „Tags“ (engl. Etikett, Marke, Auszeichner, Anhänger, Aufkleber) vorhandene Daten mit zusätzlichen Informationen zu versehen oder untereinander zu vernetzen. Die Suche nach einem oder mehreren kombinierten Tags liefert dann als Ergebnis die Inhalte der Datenbank, die alle gewünschten Begriffe enthalten. Dieses entspricht einem X-dimensionalen Gliederungsteil, wobei „X“ durch den Benutzer selbst definiert werden kann.

<sup>441</sup>Detaillierte Begründung hierzu siehe Abschnitt 6.2.2



**Abbildung 6.1** Die Beeinflussung der Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik durch den Funktionskatalog und die geometrische Funktionsanalyse. Die Legende zur Abbildung befindet sich in der Fußnote auf Seite 112.

Die bisherigen Restriktionen von Konstruktionskatalogen entfallen dabei nicht einfach, vielmehr werden sie durch neue Restriktionen ersetzt. So schränkt die gewählte Wiki-Lösung die bei bisherigen Konstruktionskatalogen gegebene Übersichtlichkeit und Möglichkeit zur schnellen Inspiration (zumindest bislang noch) ein, da die einzelnen Inhaltsseiten der Wiki zuerst angewählt und geladen werden müssen, bevor der Inhalt sichtbar wird. Dieses könnte durch eine adaptierte, geeignet gestaltete graphische Benutzeroberfläche<sup>442</sup>, die die Vorteile eines Wiki beibehält, ihre Inhalte aber in der Darstellung bisheriger Konstruktionskataloge anbietet, gelöst werden.

## 6.2 Aufbau

Die explizierende Beschreibung wahrgenommener Fakten, Zusammenhänge und Sachverhalte ist für die Forschungsmethodik grundlegend, wenn aus diesen Wahrnehmungen nachvollziehbares Wissen generiert werden soll. So ist z.B. in der biologischen Forschungsmethodik diese Denk- und Vorgehensweise fest verankert. NACHTIGALL formuliert für die adäquate (explizierende) Beschreibung gemachter Wahrnehmungen die folgenden zwei Kriterien<sup>443</sup>:

- *„Ihn [ein Faktum oder einen Vorgang] so zu beschreiben, dass die gesamte mit der Beobachtung gewonnene Information wiedergegeben wird, nichts verloren geht und auch nichts dazugedichtet wird.*
- *Ihn [ein Faktum oder einen Vorgang] mit einer Ausdrucksweise, einem Vokabular zu beschreiben, das einerseits der Fragestellung angemessen ist, andererseits aber auch eine weiterführende Bearbeitung (z.B. ein Herausdestillieren allgemeiner zugrunde liegender Prinzipien) zulässt.“*

### 6.2.1 Der Interpretationsaspekt

Insbesondere für einen Konstruktionskatalog für die Mikrosystemtechnik, mit dem der Ansatz verfolgt wird, technologie- und disziplinübergreifende Funktions-Gestaltzusammenhänge darzustellen und damit die genannten Konstruktionsbarrieren in der Analyse und Synthese von Mikrosystemen zu überwinden, lassen sich aus diesen beiden Kriterien wichtige Erkenntnisse ziehen. Einerseits reicht es nicht aus, einen Konstruktionskatalog im klassischen Sinne zu entwickeln, da damit Funktions-Gestaltzusammenhänge nicht explizit dargestellt werden. Es besteht die Gefahr, dass Informationen durch die notwendige Interpretation des

---

<sup>442</sup>GUI - graphical user interface

<sup>443</sup>Nachtigall (2010), S. 17 f.

Zusammenhangs von Funktion und Gestalt verloren gehen oder dazugedichtet werden, vgl. auch Abbildung 6.2. Das bislang hauptsächlich anzutreffende Vorgehen zur Beschreibung von Funktions-Gestaltzusammenhängen soll am Beispiel eines Mikrogreifers<sup>444</sup> beschrieben werden, vgl. Abbildung 6.2. Es besteht darin, die Abbildung eines Mikrosystems in einem zugehörigen Text bezüglich seiner Funktionen zu beschreiben. Die Verknüpfung von Funktion und Gestalt wird dabei aber nur mental und von jedem Betrachter leicht unterschiedlich durchgeführt. Soll die Verknüpfung explizit vorliegen, muss zu ihrer explizierten Darstellung eine passende Ausdrucksweise oder ein passendes Vokabular genutzt werden, das z.B. das „*Herausdestillieren allgemeiner zugrunde liegender Prinzipien zulässt*“.<sup>445</sup>

Der in dieser Arbeit entwickelte Funktionskatalog basiert somit auf der Überzeugung, dass die direkte, visualisierte Verknüpfung von Funktion und Gestalt in einem Modell (die integrierte Systembeschreibung) das Verständnis insbesondere von unerfahrenen Konstrukteuren<sup>446</sup> unterstützt.

Zur Überwindung der Technologiefokussiertheit sollen möglichst viele Funktions-Gestaltzusammenhänge verschiedener Fertigungstechnologien in einem Katalog gesammelt, dargestellt und beschrieben werden. Weiterhin sollen Funktions-Gestaltzusammenhänge disziplinübergreifend dargestellt werden, damit der zukünftige Nutzer des Katalogs umfassend über Funktions-Gestaltzusammenhänge anderer Disziplinen informiert wird. So könnte beispielsweise ein ursprünglich in der Elektronik ausgebildeter Ingenieur erkennen, auf Basis welcher Gestalt eine bestimmte chemische Funktion realisiert wird, vgl. Abbildung 4.8.

## 6.2.2 Gliederung des Funktionskatalogs

Aufgrund der oftmals genutzten monolithischen Bauweise sowie der nur wenig ausgeprägten Standardisierung und Normung in der Mikrosystemtechnik besteht das Problem, dass einerseits einzelne Bauteile oder Elemente nicht als solche vorliegen und differenziert werden können. Andererseits können diese nur schwer mit gängigen Begriffen belegt werden, vgl. Abbildung 6.2. Ein Zugriff auf die Inhalte des Katalogs über Produktgruppen und -bezeichnungen, wie es bei etablierten Sammlungen makroskopischer Maschinenelemente und -zulieferer<sup>447</sup> realisiert ist, ist daher nicht sinnvoll.

Der Zugriff auf den Katalog muss daher funktions- statt bauteilorientiert erfolgen. Damit wird einerseits dem Problem der nur wenig ausgeprägten Standardisierung und Normung und andererseits der oftmals genutzten monolithischen Bauweise begegnet, die einen bauteil-

<sup>444</sup>Vgl. Bhisitkul / Keller (2005)

<sup>445</sup>Vgl. Nachtigall (2010), S.17f.

<sup>446</sup>Hierzu können neben Jungkonstrukteuren auch erfahrene Konstrukteure gehören, deren Tätigkeitsfeld erweitert wurde und nun nicht mehr in ihrer ursprünglichen Disziplin oder Technologie liegt. Auf diesem Gebiet sind sie dann ebenfalls unerfahren.

<sup>447</sup>Vgl. Wer liefert was? GmbH (2012)

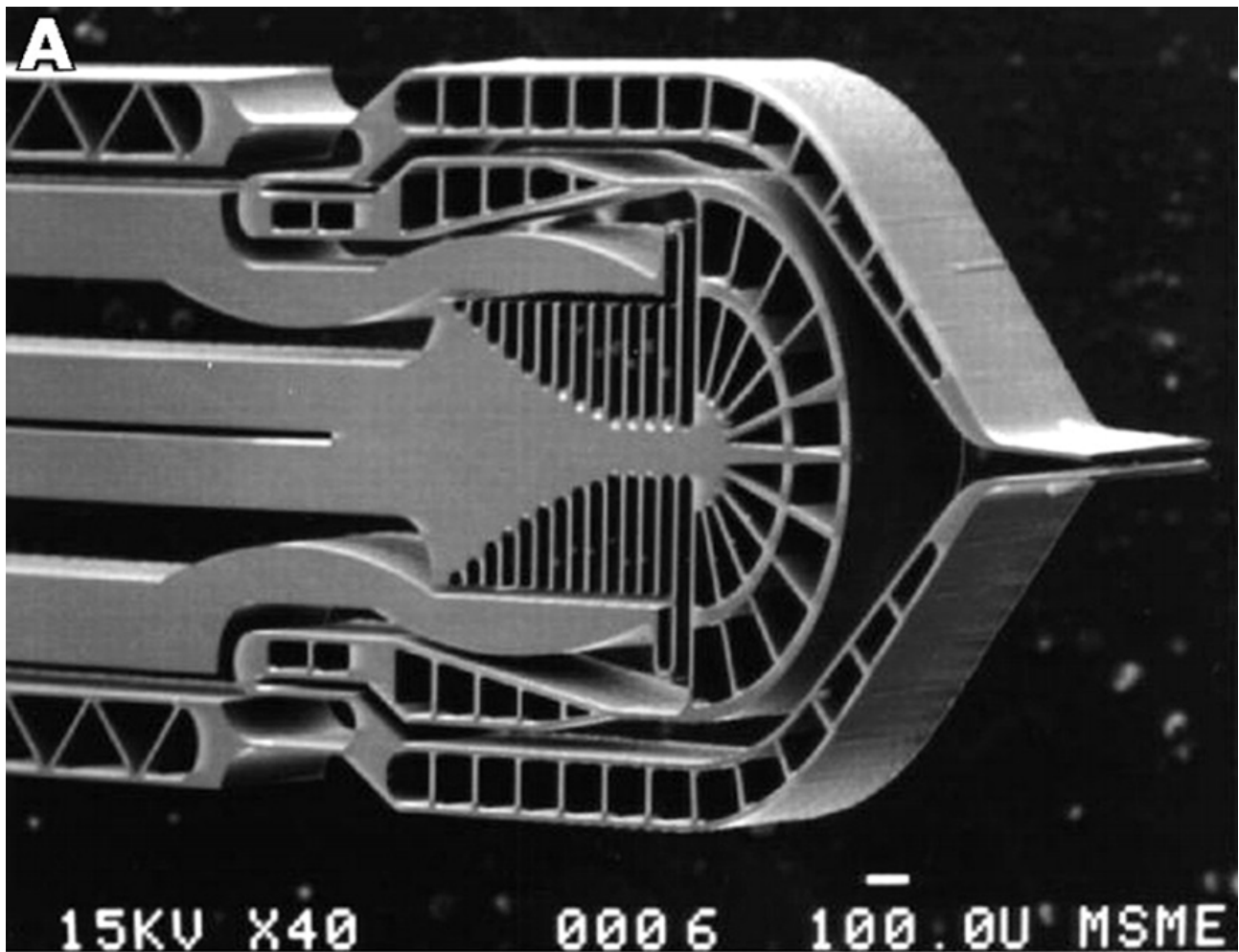


Figure 1 Prototype MEMS intraocular forceps. (A) Scanning electron micrograph of an early version of micro-tweezers with thermal expansion actuator. The device incorporates heat sink fins into the body of the tweezers; electric current actuates the tips by thermal expansion (calibration bar = 100  $\mu\text{m}$ ).

**Abbildung 6.2** Ein Mikrogreifer, dessen Funktionsweise textbasiert und dessen Gestalt bildbasiert vorliegt. Um den Funktions-Gestaltzusammenhang zu erkennen, müssen beide Quellen interpretiert und in Relation zueinander gesetzt werden. Wo *genau* im Bild ist der im Text genannte Thermoaktor zu sehen? Abbildung entnommen aus Bhisitkul / Keller (2005).

orientierten Zugriff auf die Kataloginhalte erheblich erschweren oder unmöglich machen.<sup>448</sup>

Die wesentliche Herausforderung und Neuerung im Vergleich zu bekannten Konstruktionskatalogen schließlich liegt in der Forderung, den Katalog nicht nur für synthetisierende Tätigkeiten im Konstruktionsprozess, sondern auch für die *Systemanalyse* bereitzustellen. Ein Zugriffsteil, wie er z.B. bei ROTH<sup>449</sup> beschrieben ist, ermöglicht zwar einen methodischen Zugriff auf die Inhalte eines Konstruktionskatalogs für synthetisierende Tätigkeiten - im Sinne der Überführung einer gewünschten und somit bekannten Funktion in eine mögliche, dem Konstrukteur zu dem Zeitpunkt noch unbekanntes Gestalt. Die Analyse - also das Schließen von einer vorliegenden, aber unbekanntes Gestalt auf die zugehörige Funktion - wird durch diesen Zugriffsteil nicht unterstützt. Hierzu soll die sog. „Geometrische Ähnlichkeitssuche“ adaptiert und in den Funktionskatalog implementiert werden.<sup>450</sup>

### 6.2.3 C&C<sup>2</sup>-A für Funktionsintegration

Um Funktion und Gestalt mikrotechnischer Systeme miteinander zu verknüpfen und in einem gemeinsamen Modell in Abhängigkeit voneinander darzustellen, wurde von ALBERS der Contact-, Channel- und Connector-Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A)<sup>451</sup> entwickelt. Dieser stellt verschiedene Grundelemente bereit, die unter Berücksichtigung zentraler Hypothesen<sup>452</sup> miteinander kombiniert werden können, um Funktionen technischer Systeme zu beschreiben. Wesentlich für die Darstellung von Funktions-Gestaltzusammenhängen, wie sie in dieser Arbeit für den Funktionskatalog genutzt wird, sind dabei die Grundelemente „Wirkfläche“, „Wirkflächenpaar“ und „Leitstützstruktur“:

*„Wirkflächen (WF) sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind. [...]*

*Wirkflächenpaare (WFP) werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird. [...]*

*Leitstützstrukturen (LSS) sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den*

<sup>448</sup>Vgl. Albers / Börsting (2011), Albers et al. (2011a)

<sup>449</sup>Vgl. Roth (1982), S. 40 ff.

<sup>450</sup>Vgl. Albers / Börsting (2011); Albers et al. (2011a)

<sup>451</sup>Vgl. Albers et al. (2003b)

<sup>452</sup>Vgl. Matthiesen (2002), S. 49 ff.



*Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.*<sup>453</sup>

Die korrekte Anwendung dieser Elemente formuliert ALBERS in seiner fünften Hypothese zur Produktentstehung:

*„Eine technische Funktion benötigt immer mindestens zwei Wirkflächenpaare und sie verbindende Leitstützstrukturen. Ein System kann seine Funktion(en) nur in Wechselwirkung mit seiner Umgebung erfüllen. Ein System, das keine WFP mit seiner Umgebung bildet, erfüllt keine Funktion.“*<sup>454</sup>

Um die Wechselwirkung mit der Umgebung in einem „Contact-, Channel- & Connector-Modell“ (C&C<sup>2</sup>-M) adäquat abbilden und berücksichtigen zu können, müssen die WFP an der Systemgrenze mit außerhalb der Systemgrenze liegenden Connectoren verbunden werden, die die Eigenschaften der Umgebung und damit deren Einwirkungen auf das System abbilden.<sup>455</sup>

### **Lebenszyklusfunktionen**

Auf Basis des C&C<sup>2</sup>-A besteht zusätzlich die Möglichkeit, sogenannte „Lebenszyklus-Funktionen“ darzustellen und z.B. produktionsrelevantes Wissen in die Entwicklung zurückzuführen. Als Lebenszyklusfunktionen werden im Rahmen dieser Arbeit diejenigen Funktionen eines Produkts bezeichnet, die außerhalb der eigentlichen Nutzung bzw. des Betriebs des Produkts im Laufe des Lebenszyklus realisiert werden. Dazu gehören z.B. auch Funktionen, die das Produkt oder Teile davon während der Fertigung, Qualitätssicherung etc. erfüllt. Ein Beispiel hierfür sind z.B. abgesetzte Bauteiloberflächen, die zur Positionierung von Angüssen für Spritzgießprozesse benötigt werden, vgl. Abbildung 6.3. Eine solche Fläche lässt sich anderweitig nicht funktional erklären.

## **6.2.4 Geometrische Ähnlichkeitssuche**

Die geometrische Ähnlichkeitssuche wurde entwickelt, um die Suche nach dreidimensionalen Objekten in großen Datenbanken, z.B. in CAD-PDM-Systemen oder bei der 3D-Softwarespielentwicklung, zu vereinfachen und damit die Wiederverwendungsrate zu erhöhen.<sup>456</sup> Weitere Anwendungsgebiete der geometrischen Ähnlichkeitssuche stellen beispielsweise das Molekül Docking und Molekül Design, die Computertomographie etc. dar.<sup>457</sup> Im

<sup>453</sup>Matthiesen (2002), S. 49 ff.

<sup>454</sup>Albers / Braun (2011b); vgl. auch Albers (2010)

<sup>455</sup>Vgl. Alink (2010), S. 182

<sup>456</sup>Vgl. Berchtold et al. (1997), Schubert (2010)

<sup>457</sup>Vgl. Berchtold et al. (1997)



**Abbildung 6.3** CAD-Modell des Leitrads. Auf der Stirnseite ist die abgesetzte Fläche zur Positionierung der Angüsse erkennbar.

Gegensatz zum traditionellen Zugriff auf Objekte in 3D-Datenbanken, der über Strukturinformationen sowie Textanmerkungen realisiert ist, erfolgt der Zugriff durch die geometrische Ähnlichkeitssuche inhaltsbasiert.<sup>458</sup> Die Objekte der Datenbank werden auf Basis ihrer geometrischen Merkmale (Form, Lage, Anordnung) durch spezielle Algorithmen untersucht, beschrieben und charakterisiert. Der Vergleich zweier Objekte geschieht daraufhin durch Vergleich der zuvor gebildeten, maschinenintepretierbaren Modelle (HECZKO nennt diese Modelle „Merkmalsvektoren“, vgl. Heczko et al. (2002)). Zur Interpretation verschiedener Geometrien auf Ähnlichkeit gibt es verschiedene mathematische Ansätze (Karhunen-Loeve-Transformation, Section Coding,...), die aber typischerweise auf der gleichen Grundidee basieren: eine beliebige Geometrie wird automatisiert in kleinere Polygone zerlegt. Die Polygone werden daraufhin auf geometrische Ähnlichkeit (ähnliche Umrisse, Flächenproportionen, lokale Details, Komplexität, Detaillierungsgrad, Krümmungen, etc.) überprüft.<sup>459</sup> Da es nicht *die*, sondern lediglich *eine* geometrische Ähnlichkeit von Objekten in einem bestimmten Kontext gibt, existieren ebenso viele unterschiedlicher Formeln zur Berechnung der geometrischen Ähnlichkeit von Objekten.<sup>460</sup>

<sup>458</sup>Heczko et al. (2002): „Auf Objekte aus 3D-Datenbanken wird traditionell durch angehängte Strukturinformationen sowie Textanmerkungen zugegriffen, was jedoch für viele Anwendungen unzureichend ist und durch eine inhaltsbasierte Suche ergänzt werden muß.“

<sup>459</sup>Vgl. Berchtold et al. (1997)

<sup>460</sup>Herleitungen der Berechnungsformeln für zwei verschiedene Beispiele können in Berchtold et al. (1997) und Heczko et al. (2002) nachvollzogen werden.

## 6.3 Unterstützung der Systemanalyse

Die Ausgangssituation bei der Suche von 3D-Objekten in Datenbanken einerseits und bei der Analyse unbekannter technischer Systeme andererseits ist zunächst formal dieselbe: die Geometrie eines vorliegenden Objekts wird dem Abgleich mit Geometrien bereits bekannter Objekte zugeführt. Während dieser Abgleich bei der Suche in 3D-Datenbanken automatisiert auf Basis von Merkmalsvektoren geschieht, vergleicht der Konstrukteur bei der Analyse ein unbekanntes, technisches System mit kognitiv vorhandenen mentalen Modellen ihm bekannter technischer Systeme. Wenn der Konstrukteur außerdem weiß, wie ein technisches System funktioniert, ist auch dieser Funktions-Gestaltzusammenhang in dem entsprechenden mentalen Modell repräsentiert. In dem Fall erkennt der Konstrukteur nicht nur geometrische Ähnlichkeiten zwischen unbekanntem und bekanntem System, sondern kann unter Nutzung struktureller Analogien auch auf die Funktionsweise des unbekanntes Systems schließen. Der Erfolg der Analyse hängt also maßgeblich davon ab, ob mentale Modelle bereits bekannter Funktions-Gestaltzusammenhänge vorliegen und ist somit personenabhängig.

Die Geometrische Ähnlichkeitssuche ermöglicht für die Analyse den Zugriff auf die im Funktionskatalog bereitgestellten Objekte und ihrer Funktions-Gestaltzusammenhänge und stellt somit das Pendant zum in der Synthese den Zugriff ermöglichenden Zugriffsteil eines Konstruktionskatalogs dar. Daher soll diese Funktionalität im weiteren als „Geometrische Funktionsanalyse“ bezeichnet werden.

## 6.4 Umsetzung

Die grundlegenden Ideen und Ansätze zur Umsetzung des Funktionskatalogs und zur Implementierung einer geometrische Funktionsanalyse unter Adaption der geometrischen Ähnlichkeitssuche wurden in unterschiedlichen Entwicklungsstufen bereits auf verschiedenen internationalen Konferenzen präsentiert<sup>461</sup> und als Journal-Beitrag veröffentlicht<sup>462</sup>.

Die *Umsetzung des Funktionskatalogs* und die *Realisierung der geometrischen Funktionsanalyse* durch Adaption der geometrischen Ähnlichkeitssuche und deren Anbindung an den Funktionskatalog erfolgte daraufhin im Rahmen zweier das Forschungsprojekt begleitender Diplomarbeiten<sup>463</sup> unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit. Durch die gegenseitigen Anhängigkeiten beider Diplomarbeiten war eine enge Verzahnung notwendig.<sup>464</sup>

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeiten sollen im Folgenden vorgestellt und in Relation

<sup>461</sup> Vgl. Albers / Börsting (2011) sowie Albers et al. (2011a)

<sup>462</sup> Albers et al. (2012a)

<sup>463</sup> Vgl. Weinreuter (2011) für die Realisierung des Funktionskatalogs und Allerkamp (2011) für die Implementierung der geometrischen Funktionsanalyse

<sup>464</sup> Der Zugriffsteil des Funktionskatalogs musste auf den Prozess der geometrischen Ähnlichkeitssuche abgestimmt sein.

zueinander diskutiert werden.

### 6.4.1 Umsetzung des Funktionskatalogs

Ein wesentlicher Aspekt, der bei der Entwicklung des Funktionskatalogs berücksichtigt werden muss, ist die Tatsache, dass die Mikrosystemtechnik eine noch relativ junge Disziplin ist, die täglich völlig neue Gestaltrealisierungen zu einer Funktion produziert. Während bei der Erstellung herkömmlicher Konstruktionskataloge eine wesentliche Forderung lautet, ein Lösungsgebiet umfassend abzubilden<sup>465</sup>, muss daher für den Funktionskatalog die Forderung gelten, zunächst zwangsläufig unvollständige Lösungssammlungen aufzunehmen, die sukzessiv erweitert werden.<sup>466</sup> Da dieses Vorgehen also eher die Regel als die Ausnahme sein wird, muss die Erweiterung der Lösungssammlungen möglichst einfach durchführbar sein.

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Klassierung von Konstruktionskatalogen zeigt sich, dass der zu erstellende Funktionskatalog im wesentlichen der Klasse der Lösungskataloge zuzuordnen ist, obwohl er nicht nur für *eine* Aufgabenstellung Lösungen bietet, sondern mehrere Einzelkataloge in sich vereint und damit formal auch die Kriterien für einen Objektkatalog erfüllt.

#### Technische Implementierung

Im Rahmen der Diplomarbeit zur geometrischen Funktionsanalyse<sup>467</sup> wurden verschiedene Möglichkeiten zur Datenablage – und damit zum Format des Funktionskatalogs – vor dem Hintergrund gestellter und abgeleiteter Anforderungen und Restriktionen diskutiert.<sup>468</sup> Letztlich wurde insbesondere aufgrund der Möglichkeiten zur Ankopplung an die geometrische Ähnlichkeitssuche ein Wiki-System gewählt. Vorteil dieser Lösung ist, dass keine Software auf den Client-Rechnern installiert werden muss, da ein Wiki-System plattformunabhängig ist und die Wikiinhalte über einen Browser genutzt und bearbeitet werden können. Dieses erleichtert die zukünftige Nutzung und Erweiterung des Funktionskatalogs außerhalb des Instituts (IPEK), z.B. in einem Kleinunternehmen der Mikrosystemtechnik.

Um „Tags“ nutzen zu können – eine wichtige Funktion zur Realisierung der benötigten Kategorisierung<sup>469</sup> und zur semantischen Vernetzung der Kataloginhalte – wurde die Software „MediaWiki“<sup>470</sup> ausgewählt. Diese bietet entsprechende Funktionalitäten und ist

<sup>465</sup>Vgl. Roth (1982), S.40 in Anlehnung an VDI2222: „[...] Vollständigkeit innerhalb gesetzter Grenzen gewährleisten [...]“; vgl. Pahl et al. (2005), S.152 und Ehrlenspiel (2003), S.393: „[...] Weitgehende Vollständigkeit des gesammelten Lösungsspektrums [...]“

<sup>466</sup>Vgl. Weinreuter (2011), S. 31

<sup>467</sup>Vgl. Weinreuter (2011)

<sup>468</sup>Vgl. Allerkamp (2011), S. 47 ff.

<sup>469</sup>Vgl. Abschnitt 6.4.1

<sup>470</sup>Vgl. MediaWiki.org (2012)

GPL-lizenziert<sup>471</sup>. Damit basiert der Funktionskatalog auf Software, die generell kostenlos und frei verfügbar ist und die spätere Verbreitung und Verwendung des Funktionskatalogs vereinfacht.

### **Gliederungsteil**

Der Gliederungsteil wurde in dem gewählten MediaWiki realisiert durch Nutzung von Kategorien. Damit kann sich der Nutzer in der Suche leiten lassen und relevanten Schlagworten folgen, wenn er Schlüsselwörter für die Suche nicht nutzen will oder nicht weiß, welche Schlüsselwörter er vergeben soll. Die Kategorien lassen sich beliebig erweitern und bei Bedarf umbenennen. Das Umsortieren bereits bestehender Inhalte ist aber nur mit einem erhöhten Aufwand zu realisieren. Durch Anwahl einer Kategorie erhält man eine Übersicht über die in dieser Kategorie angelegten und verfügbaren Unterkategorien. Dieses lässt sich fraktal mit jeder Unterkategorie in gleicher Weise wiederholen, bis letztendlich auf unterster Stufe die jeweilige Lösung auftaucht. Damit ist der Hauptteil des Katalogs erreicht.

### **Hauptteil**

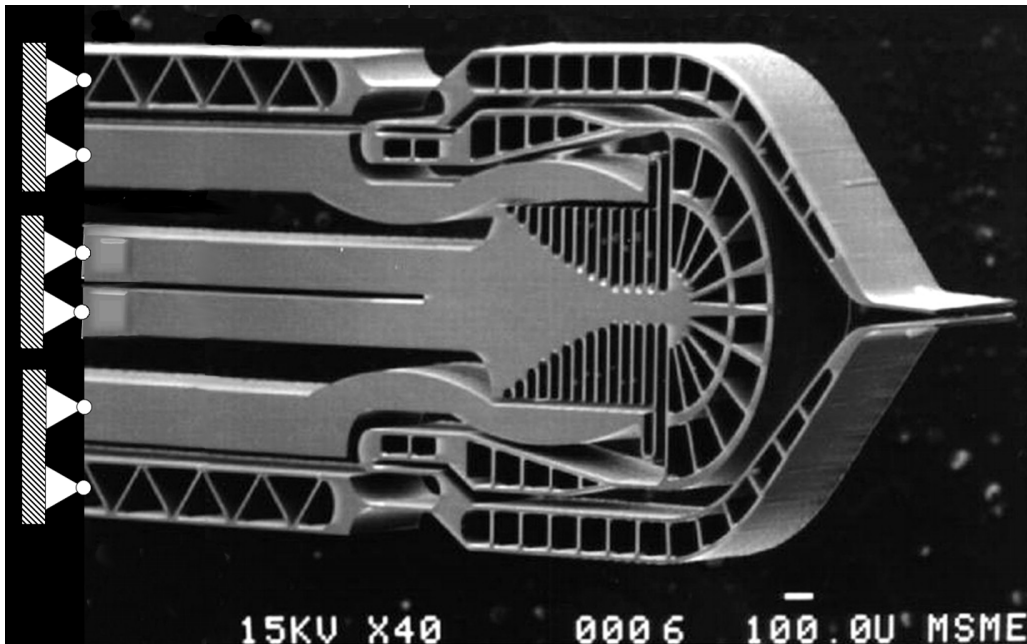
Der Hauptteil enthält neben relevanten Abbildungen der jeweiligen Lösung eine Beschreibung der Situation, in welchem Kontext die Lösung eingesetzt wird. Zusätzlich wird zur Beschreibung des Funktions-Gestaltzusammenhangs eine C&C<sup>2</sup>-M-Abbildung eingesetzt, die Funktionsstrukturen mit der Geometrie in Relation setzt. Diese C&C<sup>2</sup>-M-Abbildung wird in einem zugehörigen C&C<sup>2</sup>-M-Text erklärt. Ein Beispiel hierzu findet sich am Ende dieses Abschnitts, vgl. 6.4.1. Wird diese Art der Systembeschreibung verglichen mit der herkömmlichen Systembeschreibung, werden die Vorteile der Nutzung des C&C<sup>2</sup>-A besonders deutlich.

Die Nutzung des C&C<sup>2</sup>-A zur expliziten Darstellung von Funktions-Gestaltzusammenhängen erfordert in der Mikrosystemtechnik eine gedankliche Anpassung. Die Mehrzahl der Mikrosysteme ist monolithisch aufgebaut, d.h. das System wird entweder direkt „aus dem Vollen“ (Silizium-Bulk-Mikromechanik) oder „Schicht für Schicht“ (Silizium-Oberflächen-Mikromechanik) durch Belicht-, Ätz- und Materialauftragsprozesse hergestellt. Das schließlich erzeugte Mikrosystem besteht auf den ersten Blick aus lediglich einem komplexen Bauteil, das mit seiner Umwelt interagiert, vgl. Abbildung 6.4<sup>472</sup>. Dieses führt zu der Frage, wie und wo die Wirkflächenpaare für die Anwendung des C&C<sup>2</sup>-A zu identifizieren sind, da diese nicht so offensichtlich zwischen verschiedenen Bauteilen vorliegen, wie es bei Systemen der Fall ist, die aus unterschiedlichen Komponenten (modular) aufgebaut sind.

Die prinzipielle Anwendbarkeit und Gültigkeit des C&C<sup>2</sup>-A auf monolithische Mikrosysteme ergibt sich, wenn man nicht erst das realisierte Mikrosystem, sondern seine Konstruktion

<sup>471</sup> GPL: General Public License

<sup>472</sup> Abbildung entnommen aus Bhisitkul / Keller (2005)



**Abbildung 6.4** Monolithischer Mikrogreifer, hergestellt unter Nutzung des Deep Etching Verfahrens im Bosch Prozess (Silizium-Bulktechnik). Modifizierte Darstellung auf Basis der Abbildung aus Bhisitkul / Keller (2005).

betrachtet. Hierbei generiert der Systemkonstrukteur die Gesamtgestalt aus der Kombination verschiedener Subfunktions-Gestaltbeziehungen. Während dieser Aktivität existieren in der Vorstellung des Systemkonstruktors klar abgegrenzte Sub-Funktionen und -Strukturen, die er in der Folge zum Gesamtsystem kombiniert. Zu diesem Zeitpunkt eine Prinzipdarstellung des Systems auf Basis des C&C<sup>2</sup>-A zu erstellen, wäre für den Systemkonstrukteur ohne größere Probleme möglich. Die Sub-Systemgrenzen (und damit die Wirkflächenpaare) verschwimmen erst durch das gewählte Lösungsprinzip: eine zuvor in der Skizze prinzipiell erkennbare Gelenkfunktion wird bei der Realisierung als Festkörpergelenk unter Auflösung der relevanten Wirkflächenpaare mit den anschließenden Systemstrukturen vereinigt. Im realisierten Gesamtsystem sind die Wirkflächenpaare daher zwar physisch aufgelöst, im zugrunde liegenden Systemmodell sind diese allerdings unverändert vorhanden und können daher zur Systembeschreibung unverändert genutzt und auf der Gestalt angeordnet werden. Die Lokalisierung der Wirkflächenpaare kann dabei unter Nutzung des beim Systemkonstrukteur vorhandenen Systemverständnisses oder – falls Systemkonstrukteur und Nutzer/Betrachter unterschiedliche Personen sind – unter Identifikation bestimmter geometrischer Merkmale geschehen. Hinweise zur Identifikation von Subfunktionen auf einer Gestalt liefern beispielsweise schroffe Querschnittsübergänge, gleiche und wechselnde geometrische Muster, starke Richtungswechsel gleicher Strukturen, etc., vgl. Abbildungen 6.6 und 6.7. So besitzt LSS 67 in Abbildung 6.7 an ihrem oberen Ende eine 180 Grad Umlenkung und geht in eine erheblich dicker ausgeführte Struktur über. Deshalb wurde an der Stelle WFP 7 lokalisiert. An ihrem unteren Ende geht LSS 67 in eine ebenfalls erheblich massivere Struktur in Form eines

T-Stoßes über. Daher wurde hier WFP 6 lokalisiert. Die durch LSS 67, WFP 6 und WFP 7 repräsentierte Funktion ist eine Lagerungsfunktion, die in Form eines Festkörpergelenks ausgeführt wurde und eine horizontale Verschieblichkeit des Zugankers (halbkreisförmige Struktur in Abbildung 6.6) durch den thermo-mechanischen Aktor (WFP 1, WFP 2, LSS 12 in Abbildung 6.6) ermöglicht.

### Zugriffsteil

Bei der gewählten Implementierung des Funktionskatalogs überlappen sich Haupt- und Zugriffsteil, da sich auf der gleichen Wiki-Seite an den zuerst beschriebenen Hauptteil der Zugriffsteil anschließt. Der Zugriffsteil herkömmlicher Konstruktionskataloge enthält detaillierte technische Vor- und Nachteile sowie quantifizierte Leistungsmerkmale, die eine Unterscheidung der Lösungsalternativen ermöglichen und die Auswahl einer Lösungsvariante unterstützen. Der Zugriffsteil des Funktionskatalogs enthält dagegen typischerweise deutlich weniger quantifizierte Leistungsmerkmale, da diese für Mikrosysteme oft (noch) nicht zur Verfügung stehen (z.B. aufgrund fehlender Messmöglichkeiten). Alternativ enthalten sie mehr Hinweise zu den genutzten Produktionstechnologien, da diese in der Mikrosystemtechnik eine herausragende Relevanz besitzen. So sind bei der Entscheidung für oder gegen eine Lösungsalternative quantifizierte technische Leistungsdaten oft weniger relevant gegenüber der prinzipiellen technischen Realisierbarkeit und Implementierbarkeit auf Basis einer bestimmten Produktionstechnologie.

Der bis hierhin beschriebene Aufbau des Funktionskatalogs ist in Abbildung 6.5 visualisiert. Durch die Darstellung der strukturellen Zusammenhänge der einzelnen Teile des Funktionskatalogs wird die zugrunde liegende Orientierung an der Idee der Konstruktionskataloge verdeutlicht. Diese ist durch die Realisierung des Funktionskatalogs unter Nutzung eines Wiki-Systems verdeckt worden.

### Beispiel: Beschreibung eines Mikrogreifers im Funktionskatalog

#### Funktion: „Linearbewegung erzeugen“

**Systembeschreibung** Um eine Bewegung zu erzeugen, nutzen thermomechanische Aktoren die Eigenschaft eines Materials, sich unter Wärmezufuhr auszudehnen. Durch Anlegen einer Spannung und somit Erzeugen eines Stromflusses durch das Material erwärmt sich dieses und dehnt sich aus.

Wichtig bei thermomechanischen Aktoren ist die Erzeugung einer *Temperaturdifferenz* zwischen der Aktorstruktur und dem restlichen System. Um zu gewährleisten, dass sich nur der gewünschte Bereich erwärmt bzw. die Temperaturdifferenz möglichst groß wird, muss die Wärmeleitung zwischen Thermoaktor und restlichem System so weit wie möglich



**Abbildung 6.5** Wird die Struktur des Wiki schematisch dargestellt, wird die Ähnlichkeit des Funktionskatalogs in seinem Aufbau zu Konstruktionskatalogen deutlich. Abbildung entnommen aus Weinreuter (2011), S.33.

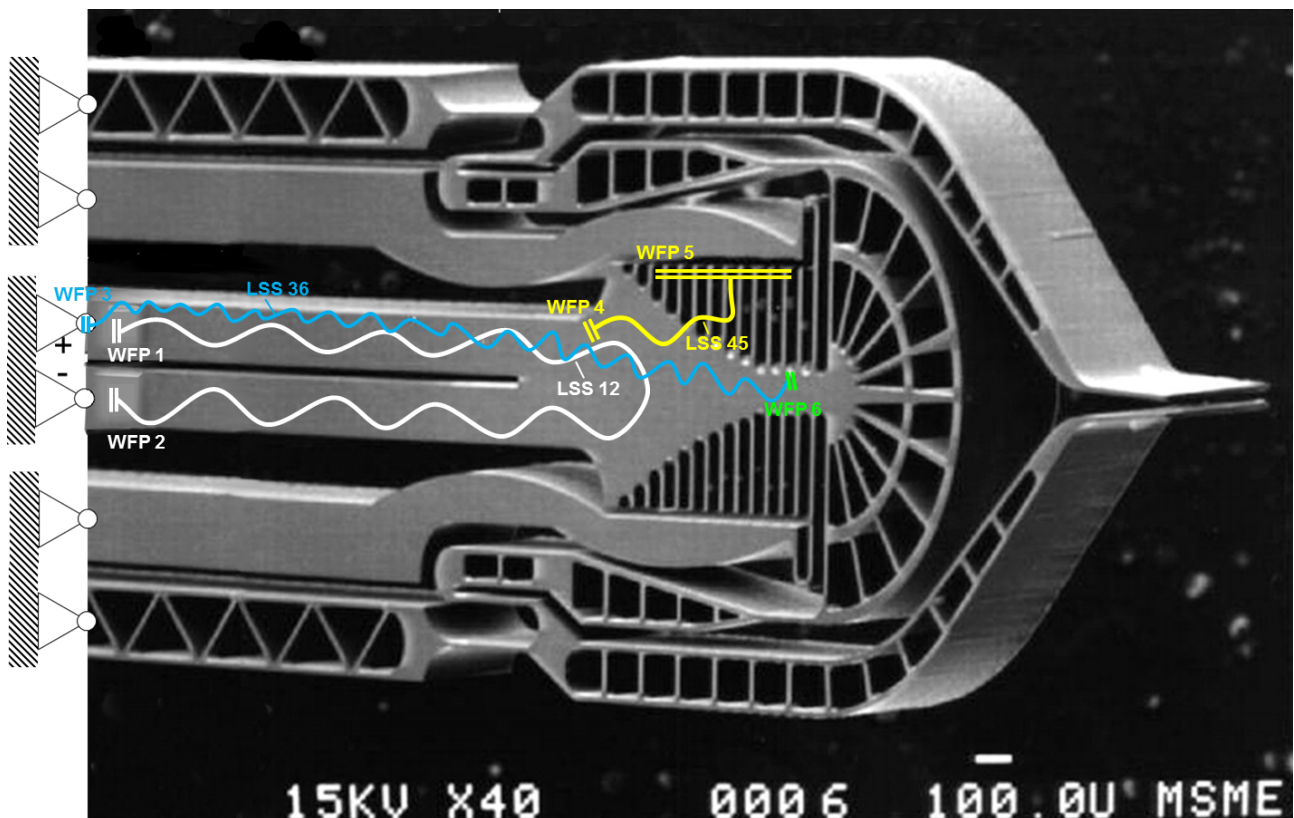
begrenzt werden. Wärmebrücken können beispielsweise durch Materialausparungen verringert werden, Kühlrippen können dem System zusätzlich gezielt Wärme entziehen. Die Kühlrippen vergrößern die Oberfläche zur kühleren Umgebungsluft und beschleunigen somit den Temperatursausgleich.

**Contact und Channel Modell** (Vgl. Abbildung 6.6<sup>473</sup>) WFP1 und WFP2 werden elektrisch kontaktiert und eine elektrische Spannung treibt einen elektrischen Strom durch das leitfähige Material zwischen den Kontakten. Der Stromfluss entlang LSS 12 führt zu einer Erwärmung des Materials. Es kommt zu einer Längenänderung entlang LSS 36 zwischen WFP3 und WFP6.

Um eine möglichst hohe Temperaturdifferenz zwischen Aktor und Rest des Systems zu erreichen und die Erwärmung möglichst auf den gewünschten Bereich zu beschränken, wird die entstehende Wärme von LSS 45 zwischen WFP4 und WFP5 durch Kühlrippen abgeführt. Zusätzlich wird der Wärmedurchgangswiderstand durch einen abnehmenden Querschnitt von LSS 45 erhöht.

<sup>473</sup>Abbildung entnommen aus Bhisitkul / Keller (2005).





**Abbildung 6.6** C&C<sup>2</sup>-M des Mikrogreifers zur Funktion „Linearbewegung erzeugen“ sowie „Wärme abführen“. Eigene Darstellung auf Basis der Abbildung von Bhisitkul / Keller (2005).

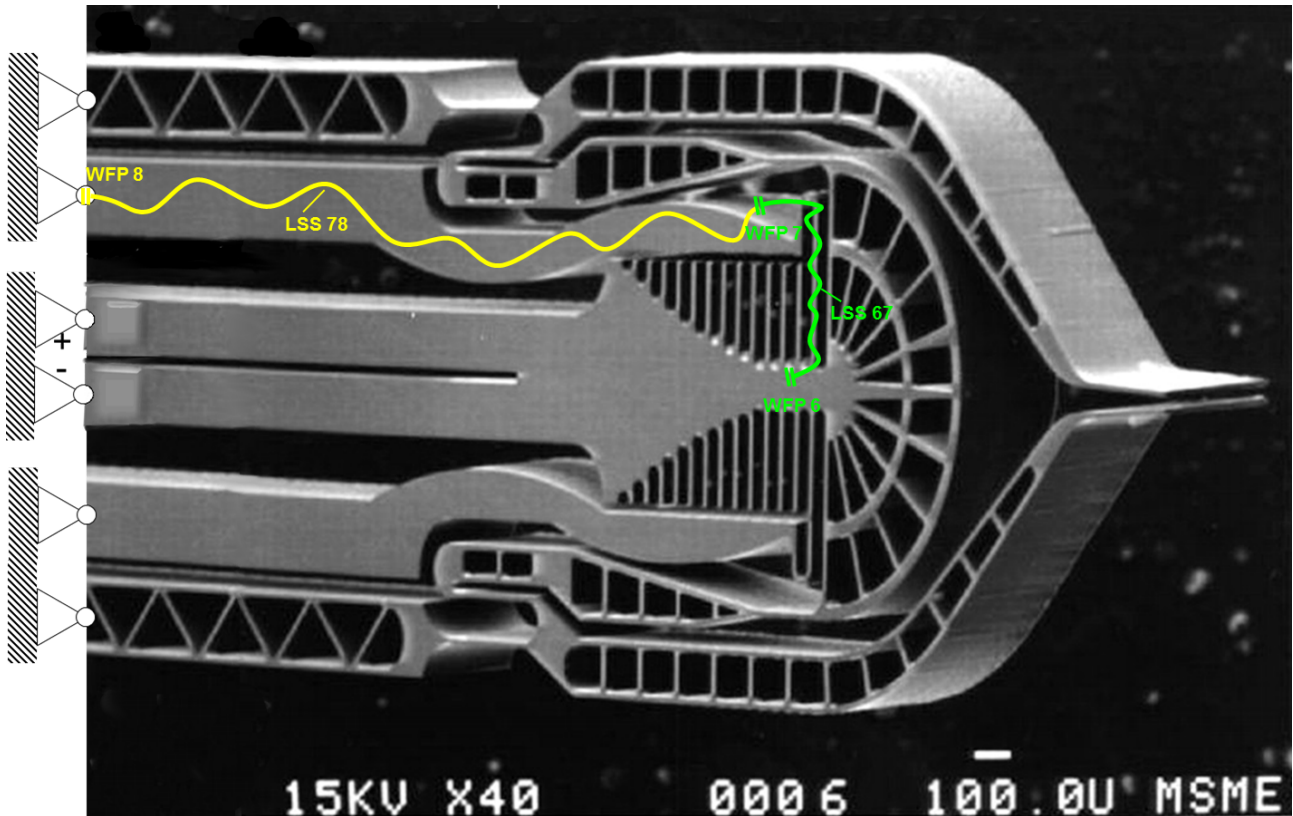
### Funktion: „Bewegung einschränken“

**Systembeschreibung** Lager werden benötigt, um gewünschte Freiheitsgrade und damit gewünschte Bewegungen zu ermöglichen. Gleichzeitig müssen Lager ungewünschte Bewegungen verhindern und somit die nicht benötigten Freiheitsgrade einschränken. Hierzu können Festkörpergelenke eingesetzt werden, die die Elastizität eines Materials zum Ermöglichen einer Bewegung und dessen Steifigkeit zum Einschränken von Bewegungen nutzen.

**Contact und Channel Modell** (Vgl. Abbildung 6.7<sup>474</sup>) Im WFP 6 wird die Kraft, die aus der Längenänderung des thermomechanischen Aktors resultiert, aufgenommen. Der Kraftfluss geht entlang LSS 67 zu WFP7, welches über LSS 78 fest mit WFP 8 verbunden ist, was Voraussetzung für die Funktionserfüllung der Lagerung ist. WFP 6, LSS 6-7 und WFP 7 stellen sicher, dass die Hauptbewegung des Aktors in horizontale Richtung ermöglicht wird (Widerstand von LSS 6-7 gegen Biegung relativ gering), gleichzeitig aber eine ungewünschte Verschiebung des Aktorendes in vertikale Richtung verhindert wird (Widerstand von LSS 6-7 gegen Stauchung/Dehnung relativ hoch). Die Eigenschaften der LSS 6-7 sind vergleichbar mit

<sup>474</sup>Abbildung entnommen aus Bhisitkul / Keller (2005).

denen eines Biegebalkens. Aufgrund der Geometrie ist sie in horizontale Richtung elastisch und in vertikale Richtung steif. Dies bedeutet, dass die vertikale Bewegung durch die höhere Steifigkeit verhindert und die horizontale Bewegung, bedingt durch die Elastizität, zugelassen wird.



**Abbildung 6.7** C&C<sup>2</sup>-M des Mikrogreifers zur Funktion „Bewegungsrichtung einschränken“. Eigene Darstellung auf Basis der Abbildung von Bhisitkul / Keller (2005).

### 6.4.2 Umsetzung der geometrischen Funktionsanalyse

Da die geometrische Ähnlichkeitssuche von der gleichen Ausgangssituation startet wie ein Konstrukteur, der die Funktionsweise eines ihm unbekanntes Mikrosystems analysieren will – eine als Suchanfrage nutzbare geometrische Form – soll die geometrische Funktionsanalyse durch Adaption der geometrischen Ähnlichkeitssuche realisiert werden. Die Analyse einer Geometrie wird also vom Konstrukteur zum Computer verlagert, um den geometrischen Abgleich mit vorliegenden Daten einer möglichst umfassenden Datenbank durchzuführen. Dadurch können beim Konstrukteur fehlende mentale Repräsentationen (vgl. Technologie- und Disziplinbarriere), die die Analyse eines unbekanntes Systems erschweren, computerseitig ergänzt werden.

## Eingabedatenformate

Als Eingabedaten für die geometrische Ähnlichkeitssuche eignen sich prinzipiell sowohl Bilder (Fotos, REM-Aufnahmen, Screenshots, etc.) als auch 2D- und 3D-Modelle (CAD, VRML<sup>475</sup>, Adobe 3D-PDF<sup>476</sup>, X3D, etc.). Bilder besitzen den Vorteil, dass sie die größte Verbreitung besitzen und am einfachsten zu beschaffen sind – dieses gilt insbesondere für Repräsentationen von Mikrosystemen, die nicht unternehmensintern vorliegen. Ein Konstrukteur, der Informationen zu Funktions-Gestaltzusammenhängen einer neuen Produktionstechnologie oder einer neuen Disziplin benötigt, muss vor allem Repräsentationen unternehmensexterner Mikrosysteme analysieren, um neues, noch nicht unternehmensintern vorliegendes Wissen über Funktions-Gestaltzusammenhänge zu generieren. Als Quellen hierfür könnten vor allem Abbildungen in Lehrbüchern, Veröffentlichungen, aus dem Internet, aus Produktkatalogen etc. genutzt werden. Abbildungen haben allerdings den Nachteil, dass sie einen relativ großen Verlust geometrischer Informationen erzeugen. Abhängig von der Perspektive sind bestimmte geometrische Informationen besser, schlechter oder gar nicht enthalten.

Im Gegensatz dazu enthalten CAD-Modelldaten unabhängig von einer bestimmten Betrachtungsperspektive alle geometrischen Informationen. Eine auf diesen Daten basierende Ähnlichkeitssuche wird im Allgemeinen also bessere Ergebnisse liefern als eine Ähnlichkeitssuche auf Basis reiner Bilddaten. Der wesentliche Nachteil von CAD-Repräsentationen ist ihre relativ schlechte Verfügbarkeit. So sind CAD-Daten unternehmensexterner Mikrosysteme kaum erhältlich.

Um die Vorteile der dargestellten Repräsentationsarten flexibel nutzen zu können, wurde in der prototypischen Umsetzung der geometrischen Funktionsanalyse sowohl die Nutzung von Bilddaten als auch von 2D-/3D-Modellen als Eingabedaten ermöglicht.

## Technische Implementierung

Die Implementierung der geometrischen Funktionsanalyse erfolgte durch Kopplung von drei voneinander unabhängigen Softwaresystemen. Die Software „CADENAS PartSolutions“<sup>477</sup> stellt die GUI<sup>478</sup> zum Formulieren der Suchanfrage sowie die dahinter liegenden Algorithmen zur Durchführung des Ähnlichkeitsvergleichs zur Verfügung. Die Software „PTC/Windchill“<sup>479</sup> dient als Datenbasis zur Bereitstellung der Referenzstrukturen und -systeme, mit denen die Suchanfragen auf Ähnlichkeit verglichen werden können. Schließlich wird die in Abschnitt 6.4.1 beschriebene Software „MediaWiki“ genutzt, um Funktions-Gestaltzusammenhänge zu beschreiben.

---

<sup>475</sup>Virtual Reality Modeling Language

<sup>476</sup>Adobe Systems GmbH (2012)

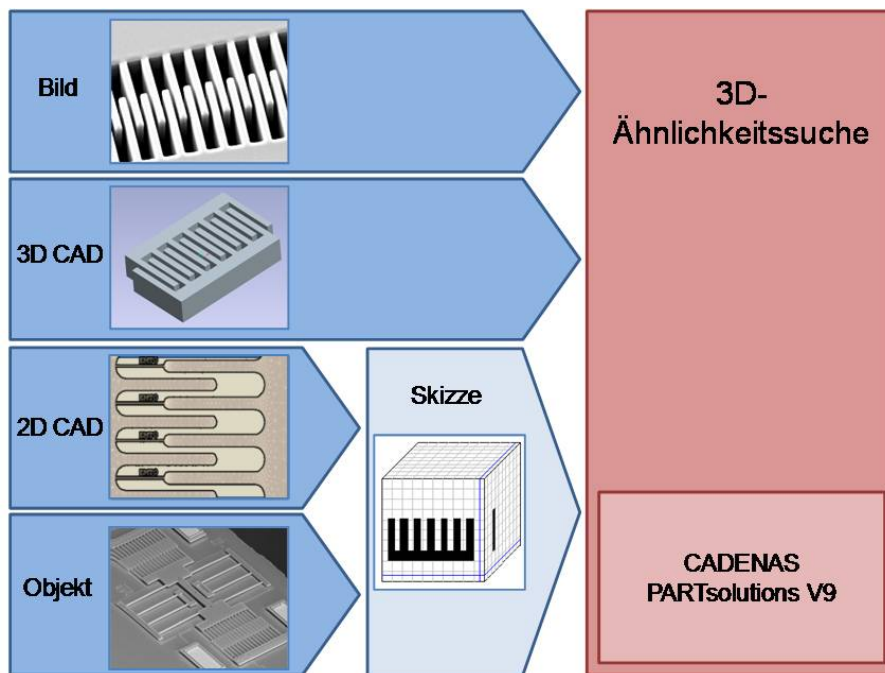
<sup>477</sup>CADENAS GmbH (2009)

<sup>478</sup>Graphical User Interface, engl. graphische Benutzeroberfläche

<sup>479</sup>Anon (2012b)

Zusätzlich bietet die gewählte Software „CADENAS PartSolutions“ die Möglichkeit, die Suchanfrage über ein in der Software vorhandenes Skizzierwerkzeug zu erzeugen. Dazu muss die unbekannte Struktur aus verschiedenen Ansichten schemenhaft dargestellt werden. Die Software errechnet daraus ein dreidimensionales Objekt, das intern als Suchanfrage weiterverarbeitet wird.

Die im Prototyp realisierte Konfiguration der Suchanfrage ist in Abbildung 6.8 visualisiert.



**Abbildung 6.8** Die Suchanfrage für die geometrische Funktionsanalyse kann auf unterschiedlichen Eingabedaten basieren. Abbildung entnommen aus Allerkamp (2011), S. 74.

## Datenbankanbindung

Die Referenzstrukturen, mit denen die Suchanfrage verglichen wird, um geometrische Ähnlichkeiten zu identifizieren, liegen unabhängig von der Art der Eingabedaten als 3D-CAD-Modelle in einer entsprechenden Datenbank (PDM<sup>480</sup>-System) vor. Diese Datenbank ist die Basis für die Ähnlichkeitssuche und muss, um adäquate Antworten zu einer Suchanfrage zu generieren, möglichst umfassend gefüllt sein mit Referenzstrukturen. Dieses konnte bislang nur prototypisch geleistet werden. Eine Möglichkeit zum weiteren Auffüllen der Datenbank wird in Abschnitt 6.4.2 diskutiert.

Damit kann also eine Suchanfrage zu einer bislang unbekanntem mikrotechnischen Struktur in einem ersten Schritt mit geometrisch ähnlichen, in dem PDM-System vorhandenen Strukturen beantwortet werden.

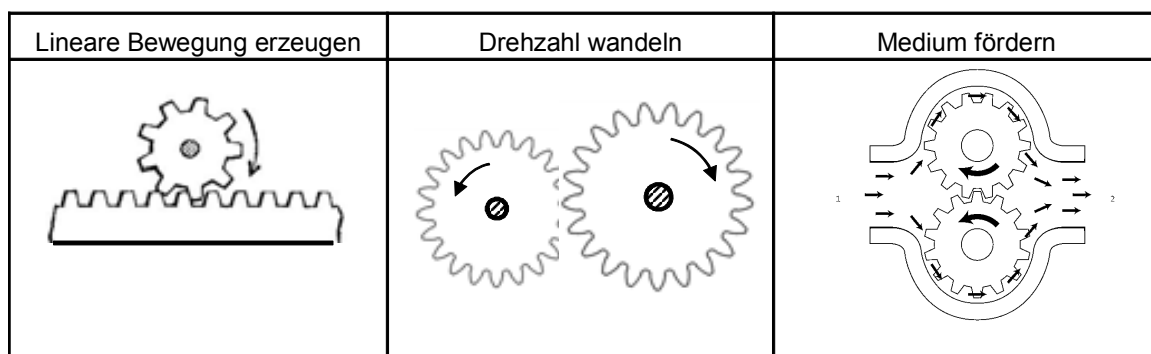
<sup>480</sup>Product Data Management

## Ankopplung an Funktionskatalog

Um in einem zweiten Schritt auf die Funktion rückschließen zu können, muss die Suchantwort verknüpft werden mit den entsprechenden Inhalten des Funktionskatalogs. Dabei ist zu beachten, dass die Funktion, die eine Struktur erfüllt, erst durch die Interaktion der Struktur in ihre Umgebung definiert wird. Deshalb wird für jede Struktur oder jedes Bauteil eine Verknüpfungsseite im Funktionskatalog angelegt, die einerseits die Verknüpfung zum PDM-System realisiert und andererseits den Zugriff auf diese Struktur in unterschiedlichen Systemzusammenhängen – und damit den Rückschluss auf die Funktion der Struktur – ermöglicht.

Die auf diese Weise erhaltene Suchantwort kann mehrere mögliche Funktions-Gestaltzusammenhänge enthalten, da sich die Funktion, die ein System erfüllt, erst im Kontext und der Interaktion des Systems mit seiner Umgebung erschließen lässt. Sie liefert somit lediglich *Hinweise* auf mögliche durch das System realisierte Funktionen. Ein einfaches Beispiel<sup>481</sup> hierzu ist ein Zahnrad, das als Input für die geometrische Funktionsanalyse dient und in Abhängigkeit seiner Systemumgebung Teil der drei folgenden Funktions-Gestaltzusammenhänge sein könnte, vgl. Abbildung 6.9:

- Wandlung rotatorischer in lineare Bewegung;
- Wandlung von Drehmoment und Drehzahl;
- Förderung eines Fluids.



**Abbildung 6.9** Zahnrad, dessen Funktion erst unter Berücksichtigung des Kontexts ermittelt werden kann. Abbildung entnommen aus Allerkamp (2011), S. 81

Der Konstrukteur muss die Ergebnisse der Analyse also weiterhin interpretieren und aus den Ergebnissen der geometrischen Funktionsanalyse das Ergebnis auswählen, das eine vergleichbare Systemumgebung besitzt. Dabei kann er durch den C&C<sup>2</sup>-A unterstützt werden, indem er die Wirkflächenpaare und Connectoren an der Systemgrenze der unbekanntem Struktur mit denen der Referenzstruktur vergleicht.<sup>482</sup>

<sup>481</sup> Beispiel entnommen aus Allerkamp (2011), S. 81 f.

<sup>482</sup> vgl. Matthiesen (2011)

Eine am Beispiel eines Kammaktors prototypisch durchgeführte geometrische Funktionsanalyse ist im Anhang 6.4.2 dokumentiert.

## Crowdsourcing

Eine Möglichkeit zur umfangreichen Erweiterung der Datenbasis und Erhöhung der Aktualität der Inhalte könnte Crowdsourcing<sup>483</sup> darstellen, das z.B. die Grundlage für Netzwerke wie „Wer liefert was?“<sup>484</sup> ist. Voraussetzung hierfür ist ein erkennbarer Benefit für die Crowd und damit verbunden die Frage, welches Interesse ein Unternehmen haben könnte, von ihm entwickelte Funktions-Gestaltzusammenhänge detailliert zu beschreiben.

Ein Unternehmen könnte die von ihm entwickelten Funktions-Gestaltzusammenhänge in einer Detailtiefe beschreiben, die einerseits einen Transfer von Kernkompetenzen vermeidet, es andererseits aber potentiellen Konstrukteuren ermöglicht, diese Funktions-Gestaltzusammenhänge in ihre Konstruktionen einzubeziehen. Eine modulare Einbindung unter Nutzung eines entsprechenden Subsystems würde sich direkt positiv auf den Umsatz des Unternehmens als Zulieferer auswirken. Eine nicht-modulare (integrale) Einbindung des Funktions-Gestaltzusammenhangs könnte hingegen durch Lizenzierung erfolgen. In beiden Fällen ließe sich der Marktanteil hochspezialisierter Zulieferer und die Marktdurchdringung ihrer Funktions-Gestaltzusammenhänge steigern.

Viel wesentlicher ist aber der folgende Aspekt, den der Verfasser dieser Arbeit auf vielen verschiedenen Konferenzen in ähnlicher Weise beobachten konnte. Universitäten und Forschungseinrichtungen erforschen und entwickeln im Bereich der Mikrosystemtechnik häufig neue oder Modifikationen existierender Produktionsverfahren. Damit wird oft die Erzeugung völlig neuer Strukturen möglich, ohne dass schon konkrete Anwendungen für diese Strukturen existieren – der typische Technology-push<sup>485</sup>. Die Bereitstellung solcher Strukturen im hier entwickelten Funktionskatalog fördert das Wissen um ihre Existenz, die Einbindung in Konstruktionen und die Verbreitung dieser Strukturen und der zugrunde liegenden Produktionsverfahren. Da das technische Know-how oft nicht in der Struktur selbst, sondern in der Art und Weise ihrer Erzeugung liegt, ist in diesem Fall auch kein Abfließen von Kernkompetenzen

<sup>483</sup>engl. „Schwarmauslagerung“; „Crowdsourcing ist eine interaktive Form der Leistungserbringung, die kollaborativ oder wettbewerbsorientiert organisiert ist und eine große Anzahl extrinsisch oder intrinsisch motivierter Akteure unterschiedlichen Wissensstands unter Verwendung moderner IuK-Systeme [Informations- und Kommunikationssysteme] auf Basis des Web 2.0 einbezieht. Leistungsobjekt sind Produkte oder Dienstleistungen unterschiedlichen Innovationsgrades, welche durch das Netzwerk der Partizipierenden reaktiv aufgrund externer Anstöße oder proaktiv durch selbsttätiges Identifizieren von Bedarfslücken bzw. Opportunitäten entwickelt werden.“ Martin et al. (2007)

<sup>484</sup>Wer liefert was? GmbH (2012)

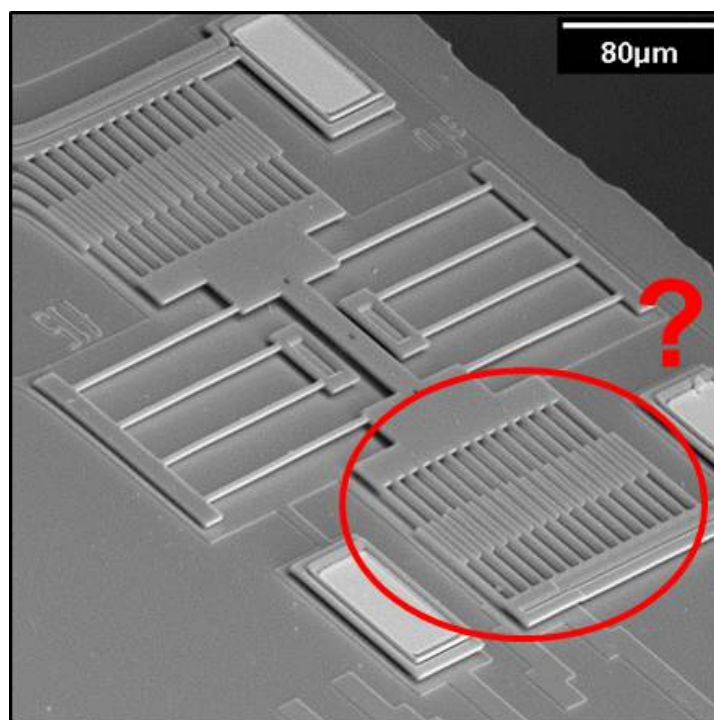
<sup>485</sup>„[...] technologische Entwicklung, die, unabhängig von am Markt identifizierten Kundenbedürfnissen, auf Basis des unternehmensinternen Technologie- und Leistungspotenzials realisiert und am Markt eingeführt wird. Das Ergebnis einer Technology-Push-Strategie sind häufig radikale Innovationen mit hohem Ertragspotenzial, deren Realisierung sowohl mit hohem Zeitaufwand als auch erheblichen Risiken verbunden ist. So steht bei radikalen Innovationen der Gefahr, keinen Markt zu finden, die Chance gegenüber, durch neue Technologien neue Märkte zu schaffen.“ Möhrle / Specht (2012)

zu befürchten. Kooperationsmöglichkeiten zwischen den Nutzern und den Herstellern neuartiger Mikrostrukturen ließen sich so vereinfacht auffinden, Markteintritt und -durchdringung neuer Produktionsverfahren würden somit unterstützt.

### Beispiel: Exemplarischer Ablauf der geometrischen Funktionsanalyse

An dem folgenden Beispiel einer zunächst unbekanntem mikrotechnischen Struktur soll der Ablauf und die Funktionsweise der geometrischen Funktionsanalyse dargestellt werden. Das Beispiel sowie die in dem Beispiel genutzten Abbildungen stammen ursprünglich aus einer vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Diplomarbeit.<sup>486</sup>

**Unbekanntes Subsystem** Eine zunächst völlig unbekanntem mikrotechnische Struktur soll analysiert werden. Ziel der Analyse ist das Erkennen der Funktion, die durch diese Struktur erfüllt wird. Sobald die Funktion der Struktur bekannt ist, erhöht sich das Potential, in der Folge weitere Funktions-Gestaltzusammenhänge im System zu erkennen. Die unbekanntem, mikrotechnische Struktur ist in Abbildung 6.10<sup>487</sup> rot umrandet dargestellt.

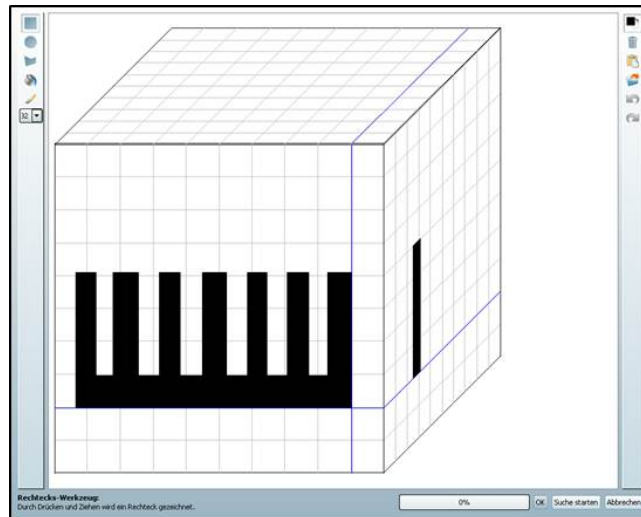


**Abbildung 6.10** Mikrosystem mit unbekannter, „kammartiger“ Struktur, deren Funktion ermittelt werden soll. Abbildung entnommen aus Allerkamp (2011).

<sup>486</sup>Vgl. Allerkamp (2011), S. XV ff.

<sup>487</sup>Abbildung entnommen aus Anon (2003) zitiert in Allerkamp (2011), S. XV und nachträglich vom Verfasser dieser Arbeit modifiziert.

**Generierung der Suchanfrage** Die Abbildung (oder ein entsprechender Ausschnitt) könnte direkt als Suchanfrage genutzt und in das Programm für die Ähnlichkeitssuche geladen werden. Um das Skizzieren der Suchanfrage zu demonstrieren, wurde die in Abbildung 6.11 dargestellte vereinfachte Skizze der unbekanntenen Struktur direkt im Programm für die Ähnlichkeitssuche erstellt. Diese Skizze wird daraufhin von der Software mit im PDM-System vorhandenen Daten verglichen. Das PDM-System wurde für den prototypischen Betrieb zuvor mit verschiedenen 3D-CAD-Modellen mikrotechnischer Systeme gefüllt.



**Abbildung 6.11** Skizze wird für geometriebasierte Suchanfrage erstellt. Abbildung entnommen aus Allerkamp (2011).

**Datenbankabgleich Suchantwort** Die Suchantwort besteht aus verschiedenen geometrisch ähnlichen Strukturen, die in absteigender Rangfolge in einem entsprechenden Programmfenster dargestellt werden, vgl. Abbildung 6.12. Die Trennschärfe lässt sich im Programm dynamisch einstellen und liefert fokussiertere oder weniger fokussierte Antworten. Die Treffgenauigkeit hängt dabei ab von der Menge der im PDM-System vorhandenen Strukturen und Systeme und ist aufgrund des prototypischen Betriebs im Rahmen dieser Arbeit limitiert.

**Einordnung in Systemzusammenhang und Funktionsanalyse** Die Einordnung in den Systemzusammenhang erfolgt über eine zwischengeschaltete Seite im Funktionskatalog, die über einen zu generierenden Link aufgerufen wird, vgl. Abbildung 6.14. Dieser Link setzt sich aus einem statischen<sup>488</sup> und einem dynamischen Teil<sup>489</sup> zusammen. Der dynamische Teil wird dabei definiert durch die Benennung der gefundenen Struktur bzw. das gefundene Bauteil. Im Prototypenbetrieb muss diese Verknüpfung manuell hergestellt werden, ließe sich aber prinzipiell auch automatisch herstellen.

<sup>488</sup>hier: <http://127.0.0.1:8080/mediawiki/index.php/Datei:>

<sup>489</sup>hier: Kamm.jpg



The screenshot shows a CAD software interface with a search window. The top part displays a 3D model of a comb structure on a grid. The search window on the right has a 'Suchvorlage wählen' section with two options: 'Skizzensuche' and 'Skizzensuche (Größenverhältnis relevant)'. Below this, there are controls for 'Suchergebnisse unter 85 % ausblenden' and 'Maximal Anzahl der Suchergebnisse: 100'. A 'Suche starten' button is at the bottom left of the search window. Below the search window is a table of search results.

	Rang	Ähnlichkeit	Vorschau (...)	Firmen...	Katalog	Name	X (SIZE)	Y (SIZE)	Z (SIZE)	FV1 (...)
	1	93%		nativeparts	kamm.prt	185.86...	102.73...	34.000...	93%	
	2	91%		nativeparts	mikrofluidischer-kanal.prt	7.0000 ...	4.0000 ...	1.0000 ...	91%	
	3	91%		nativeparts	sensor-fluessigmetalltropfen.asm	7.0000 ...	4.0000 ...	1.0000 ...	91%	
	4	90%		nativeparts	kammaktor-kapazitiv.asm	201.26...	135.11...	34.000...	90%	
	5	90%		nativeparts	basis-beschlsensorpiezo.prt	0.6000 ...	1.5000 ...	0.3472 ...	90%	

**Abbildung 6.12** Die Suchantwort findet geometrisch ähnliche Systeme und gibt sie in absteigender Ähnlichkeit als Suchantwort aus. Abbildung entnommen aus Allerkamp (2011).

The screenshot shows a web interface for a file named 'Kamm.jpg'. The interface includes a navigation menu on the left, a search bar, and a main content area with tabs for 'Datei', 'Diskussion', 'Bearbeiten', 'Versionen/Autoren', 'Löschen', 'Verschieben', 'Schützen', and 'Beobachte'. The main content shows the file name, a thumbnail of a comb-like structure, and a table of file versions. The table has columns for 'Alle Versionen löschen', 'Version vom', 'Vorschaubild', 'Maße', 'Benutzer', and 'Kommentar'. The current version is 'aktuell' from '07:55, 6. Okt. 2011' by 'Admin'.

		Version vom	Vorschaubild	Maße	Benutzer	Kommentar
Alle Versionen löschen	aktuell	07:55, 6. Okt. 2011		175×118 (8 KB)	Admin ( <a href="#">Diskussion</a>   <a href="#">Beiträge</a>   <a href="#">Sperrern</a> )	

**Abbildung 6.13** Durch die Verknüpfung mit dem Funktionskatalog kann die Einordnung in den Systemkontext und schließlich die Funktionsanalyse vorgenommen werden. Abbildung entnommen aus Allerkamp (2011).

Die zwischengeschaltete Seite des Funktionskatalogs dient als Hub zur Einordnung der enthaltenen Struktur, des Elements oder des Bauteils in einen spezifischen Systemzusammenhang. Erst durch diese Spezifizierung gelangt der Anwender zur Beschreibung des Funktions-Gestaltzusammenhangs in dem Funktionskatalog, vgl. Abbildung 6.14.

## 6.5 Bewertung des Ansatzes

Durch den entwickelten Funktionskatalog kann der Konstrukteur von Mikrosystemen zukünftig ein Hilfsmittel nutzen, das es ihm erlaubt, seine disziplinen- und technologiespezifischen Sichtweisen und Funktions-Gestaltzusammenhänge um weitere, übergreifende Funktions-Gestaltzusammenhänge zu ergänzen. Damit können sowohl die Disziplinen- als auch die Technologiebarriere in der Mikrosystemtechnik überwunden werden. Die wesentlichen Ursachen der Intuitionsbarriere werden vom Funktionskatalog zwar nicht direkt angesprochen, dennoch ergibt sich durch ihn die Möglichkeit, Ideen für neue Prinzipallösungen durch Analogie-

Seite
Diskussion
Bearbeiten
Versionen/Autoren
Löschen
Verschieben
Schützen
Beobachten

**IPEK**

Navigation

- [Hauptseite](#)
- [Alle Seiten](#)
- [Kategorienbaum](#)
- [Zufällige Seite](#)
- [Hilfe](#)

Suche

Werkzeuge

- [Links auf diese Seite](#)
- [Änderungen an verlinkten Seiten](#)
- [Datei hochladen](#)
- [Spezialseiten](#)
- [Druckversion](#)
- [Permanenter Link](#)

## Kapazitiver Kamm-Aktor

### Systembeschreibung




Abbildung 3

Um eine Bewegung zu erzeugen, nutzen kapazitive Aktoren parallele Flächen, die unter Spannung gesetzt werden, vgl. Abbildung 1. Je nachdem, ob die gegenüberliegenden Flächen ungleiche oder gleiche Ladung besitzen, wirken dazwischen anziehende bzw. abstoßende Kräfte. Die Flächen entsprechen also den Elektroden eines Mikrokondensators und die dabei entstehende Kraft ist quadratisch proportional zur angelegten Spannung.

Die Kraftwirkung wird verstärkt, indem viele solcher Kondensator-Anordnungen parallel zueinander geschaltet werden. So entsteht eine Struktur, die einem Kamm ähnelt, vgl. Abbildung 2 und 3. Die Kraft und damit die erzeugte Bewegung findet parallel der geladenen Oberflächen statt, vgl. „F<sub>x</sub>“ in Abbildung 2. Die ineinandergreifenden Kämmen\* (vgl. Abbildung 3) bewegen sich also auseinander/zusammen.

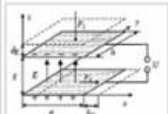


Abbildung 1

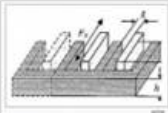
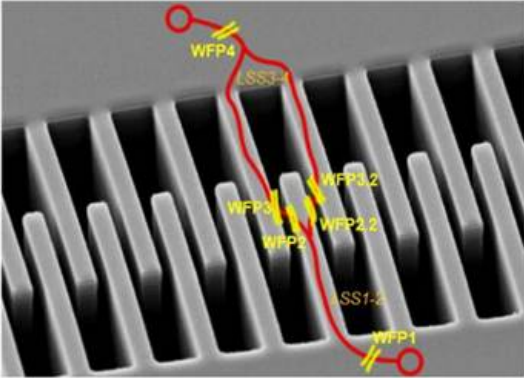


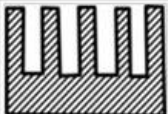
Abbildung 2

### C&CM



An die Connectoren an WFP1 und WFP4 wird Spannung angelegt. Diese gelangt entlang LSS1-2 und LSS3-4 an die Oberflächen der Kammstruktur (WFP2, WFP2.2, WFP3, WFP3.2). Dort entstehen zwischen gegenüberliegenden Oberflächen elektr. Felder entlang LSS2-3 (WFP2 nach WFP3) sowie LSS2.2-3.2 (WFP2.2 nach WFP3.2). Entsprechend der Ladungen (gleiche Ladungen / unterschiedliche Ladungen) entstehen so abstoßende oder anziehende Felder, die die Kammstruktur auseinanderdrücken oder mehr zueinander bewegen.

### Elemente in diesem System



Kamm

Kategorien: [Lineare Bewegung erzeugen](#) | [LIGA](#)

**Abbildung 6.14** Beschreibung des Funktions-Gestaltzusammenhangs im Funktionskatalog.

en zu bereits beschriebenen Lösungen zu wecken. Da die beschriebenen Systeme bereits in der richtigen Größenordnung vorliegen, ist dabei zu erwarten, dass es in dem Falle zu geringeren Skalierungsproblemen kommt, als wenn Analogien zwischen Makro- und Mikrowelt gebildet würden.

Mithilfe der geometrischen Funktionsanalyse wurde die erstmals im Rahmen der vorliegenden Arbeit präsentierte Idee umgesetzt, ein unbekanntes technisches System (teil-) automatisiert zu analysieren. Voraussetzung hierfür sind ähnliche technische Systeme, deren Funktions-Gestaltzusammenhänge bereits explizit vorliegen, z.B. in einer Datenbank. Damit lässt sich der Funktionskatalog nicht nur für systemsynthetisierende, sondern bereits für systemanalysierende Aktivitäten einsetzen. Diese Art der Konstruktionsunterstützung war bislang durch Konstruktionskataloge prinzipiell nicht möglich. Zukünftig könnten auf diese Weise alle Konstrukteure, die sich mit unbekanntem technischen Systemen auseinandersetzen müssen, unterstützt werden. Neben Mikrosystemkonstrukteuren könnten dies ebenso Studenten in verschiedenen Ingenieursdisziplinen sein, die sich im Laufe ihres Studiums zu Lernzwecken eingehend mit der Funktionsweise verschiedenster technischer Systeme auseinandersetzen müssen. Ebenso könnten in der Mechatronik tätige Konstrukteure von den hier entwickelten Möglichkeiten zur Konstruktionsunterstützung profitieren und z.B. gegenseitiges, disziplinübergreifendes Verständnis entwickeln.

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit der geometrischen Funktionsanalyse – also die Analyse unbekannter Strukturen und Systeme und die anschließende Verknüpfung mit Hinweisen zu ihrer Funktionsweise – konnte bereits Allerkamp in ihrer Arbeit zeigen. Ob dieser Ansatz allerdings praxistauglich ist und ob sich diese Methode in etablierte Workflows einbinden ließe, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden. Zwar müsste die softwaretechnische Umsetzung für einen produktiven Einsatz der geometrischen Funktionsanalyse professionell durchgeführt werden, allerdings sollte das auf Basis der hier geleisteten Vorarbeiten und Klärung der Anforderungen und Randbedingungen an die Softwarelösung keine unlösbaren Schwierigkeiten bereiten.

Die größte Herausforderung liegt nach Auffassung des Verfassers hingegen in dem Ausbau des Funktionskatalogs mit neuen und der Pflege der vorhandenen Daten zu Funktions-Gestaltzusammenhängen. Der Nutzen des Katalogs sowie der geometrischen Funktionsanalyse wird umso größer, je mehr Funktions-Gestaltzusammenhänge beschrieben und je diversifizierter diese angelegt sind. Ein Ansatz zur Lösung dieser Herausforderung wurde in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, ob dieser allerdings realisierbar und tragfähig ist, müssen nachfolgende Untersuchungen bewerten.

# 7 Zentrum für integrierte Mikroproduktion

Die prinzipiell funktionsfähigen Ansätze zur Konstruktionsunterstützung müssen wie im vorhergehenden Kapitel diskutiert anwenderfreundlich aufbereitet werden, um eine praktische Nutzung in realen Produktentwicklungsprojekten zu ermöglichen. Erst dadurch kann die Funktionsfähigkeit und Praxistauglichkeit der Ansätze validiert werden. Da diese umfassende Nutzung und Validierung über den Rahmen der vorliegenden Arbeit weit hinaus geht, ist es umso wichtiger, die Ergebnisse dieser Arbeit möglichst einfach und nachhaltig verfügbar zu machen, um damit ein zukünftiges Modifizieren und Aufbauen auf Vorhandenem zu ermöglichen. Hierzu bot sich die Bereitstellung des Funktionskatalogs im „Zentrum für integrierte Mikroproduktion“ (ZIM) an, da dieses ursprünglich vom Verfasser dieser Arbeit im Rahmen des SFB 499 entwickelte ZIM dem Funktionskatalog strukturell ähnliche, bereits vorhandene Informationssysteme des SFBs zur Konstruktionsunterstützung zur Verfügung stellt.

## 7.1 Motivation für das ZIM

Die im Rahmen der Projektlaufzeit des SFB 499 entwickelten Kompetenzen sollten auch zukünftig aus dem KIT heraus angeboten und durchgeführt werden können. Dazu musste die im SFB erarbeitete Wissens- und Methodenbasis anwendergerecht aufbereitet werden. Zusätzlich sollten die Erfahrungen des gesamten SFB in Bezug auf teilprojektübergreifende Interaktionen zur Durchführung integrierter Produktentstehungsprozesse in strukturierter Form gebündelt und bereitgestellt werden.

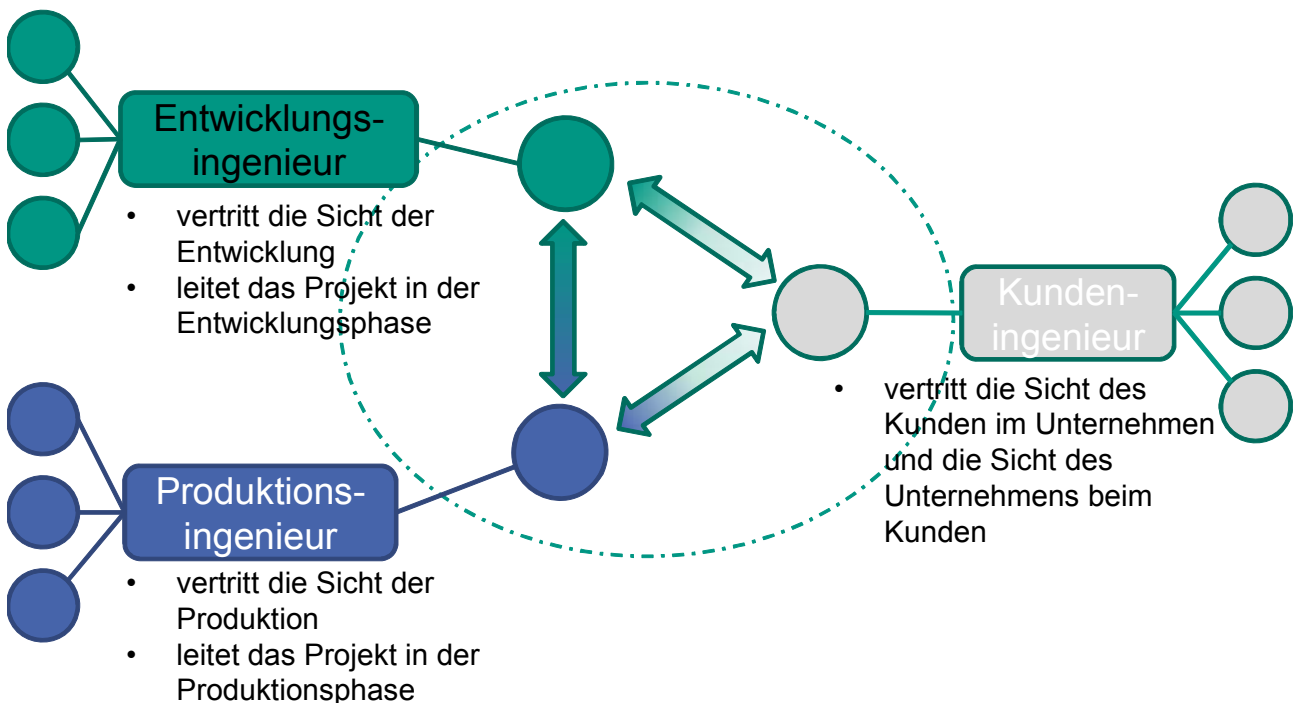
Wesentliche Arbeitsgrundlage für das ZIM ist das in Abschnitt 2.7 beschriebene Referenzprozessmodell, auf dessen Basis zukünftige Projekte geplant und überwacht, die vielfältigen Interaktionen zwischen den Akteuren koordiniert sowie die Unterstützung der Entwicklungsingenieure realisiert werden können. Damit ist eine passende Umgebung vorhanden, in deren Rahmen die Nutzung und Validierung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Ansätze zur Konstruktionsunterstützung umgesetzt werden kann – die Rahmenbedingungen für eine an diese Arbeit anschließende Validierung der entwickelten Konstruktionsunterstützungen sind also geschaffen. Der in Kapitel 6 präsentierte **Funktionskatalog** wurde konsequenterweise in dieses Nachhaltigkeitskonzept integriert. Dadurch wird sowohl dessen Nutzung für

Entwicklungsingenieure als auch die Anknüpfung zukünftiger Forschungsarbeiten an dieses Thema vereinfacht.

Um die organisatorische Funktionsweise des ZIM verstehen zu können, wird im Folgenden beschrieben, wie das ZIM durch eine entsprechende Aufbauorganisation an die strukturellen Gegebenheiten des KIT angepasst und in ihm verankert wurde.

## 7.2 Aufbauorganisation

Für die Aufbauorganisation wurde der Ansatz des Core-Team-Managements<sup>490</sup> gewählt, da es damit möglich ist, die zur Durchführung eines PEP benötigten Kompetenzen projektspezifisch einzubinden.



**Abbildung 7.1** Core-Team-Management zur Aufbauorganisation. Eigene Darstellung in Anlehnung an Albers (1994).

Sobald sich Projekte im Bereich der urformenden Mikro-Produktion anbahnen, tritt das „Zentrale Kompetenzteam“ zusammen, um über die Projektanfrage zu beraten und gegebenenfalls ein Angebot an den Kunden abzugeben. Im Zentralen Kompetenzteam sind alle Kompetenzen des ehemaligen SFB vertreten, so dass die Beratung und Entscheidung zu Projektanfragen schnell und effizient durchgeführt und die weitere Projektbearbeitung angestoßen werden kann. Die Tatsache, dass sich je nach Fortschritt eines PEP dessen Aktivitätsschwerpunkte verlagern sowie die benötigten Kompetenzen ändern, lässt sich mithilfe des Core-Team-Managements abbilden. Je nach Fortschritt des PEP übernimmt der

<sup>490</sup>Vgl. Albers (1994)

Kompetenzträger, der in der jeweiligen Phase im Zentrum steht, die Federführung. Weiterhin werden Kompetenzen, die in der jeweiligen Phase nicht benötigt werden, wieder freigegeben. Dadurch wird eine möglichst ressourcenschonende und selbstorganisierende Organisationsform erreicht, die an die personelle Ausstattung des ZIM angepasst ist, vgl. Abbildung 7.1. Zur aktiven Projektakquise nutzt das ZIM das Innovationscluster mikro-now!<sup>491</sup>, das als „One Face to the Customer“ alle Mikroaktivitäten des KIT bündelt und nach außen anbietet und vertritt.

Zur Verankerung des Zentrums für integrierte Mikrofertigung innerhalb des KIT wurde die oben beschriebene Aufbauorganisation (vgl. Abbildung 7.2) realisiert.

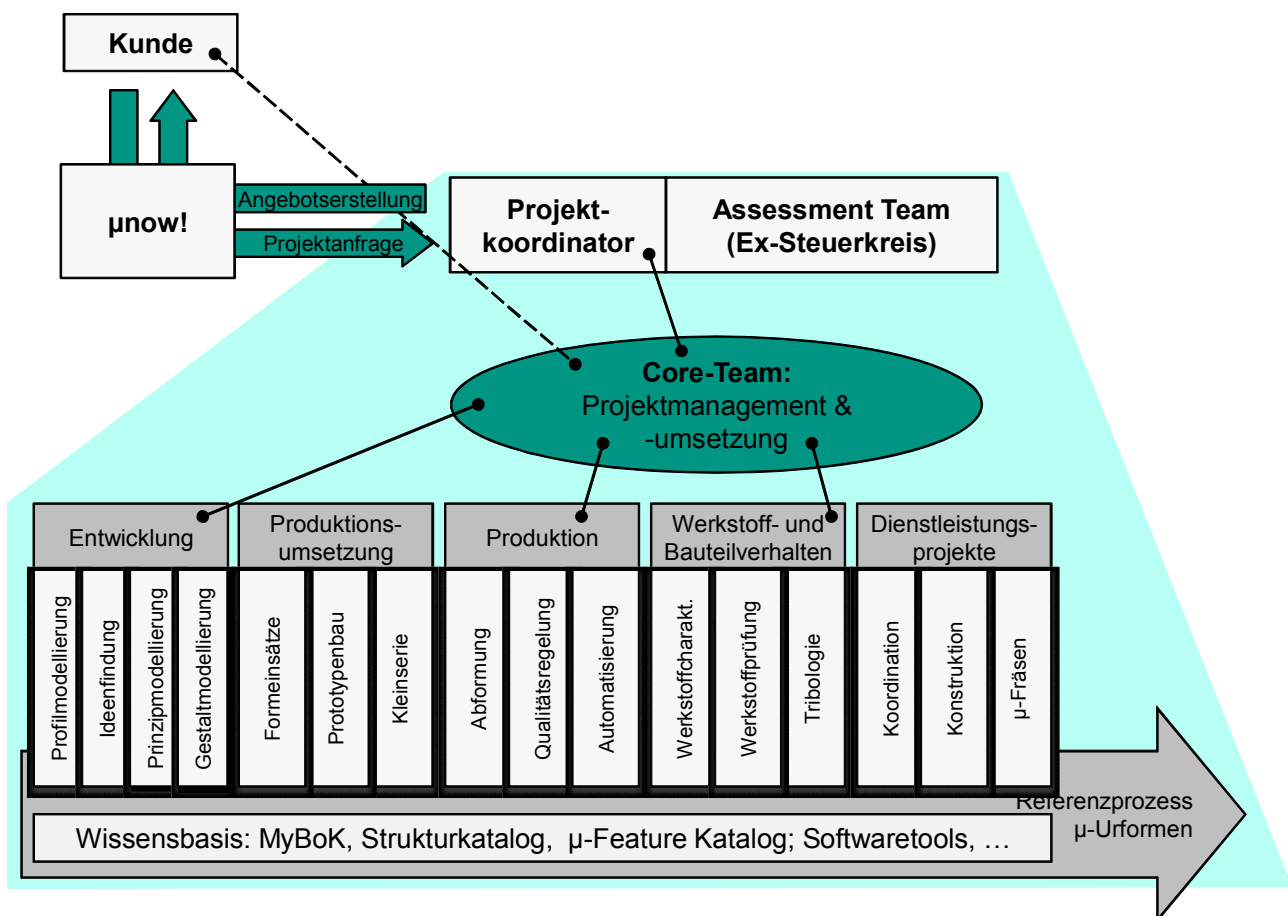


Abbildung 7.2 Struktur des Zentrums für integrierte Mikrofertigung.

## 7.3 Informatrische Integration

Für eine optimale informatrische Integration im Sinne der Integrierten Produktentwicklung wurde eine entsprechende Homepage<sup>492</sup> eingerichtet, vgl. Abbildung 7.3. Diese Homepage besteht aus einem öffentlichen und für jeden Besucher zugreifbaren Bereich sowie einem

<sup>491</sup> Vgl. Weber

<sup>492</sup> Vgl. Börsting (2011)

internen Bereich, der nur innerhalb des KIT-Intranets und nur mit entsprechenden Zugangsdaten verfügbar ist. Damit bietet sich insbesondere für die Bereitstellung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Konstruktionsunterstützung die Möglichkeit, abgestufte Zugriffsberechtigungen zu realisieren. So könnten die Inhalte des Konstruktionskatalogs öffentlich und allgemein verfügbar sein, während auf die im Hintergrund liegenden Datenbanken und deren Inhalte nur registrierte Nutzer oder weiter eingeschränkte Nutzergruppen (z.B. Wissenschaftler des IPEK oder kooperierender Forschungseinrichtungen) Zugriff haben.

HOME | ENGLISH | IMPRESSUM | SITEMAP | KIT

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

Zentrum für integrierte Mikroproduktion (ZIM)

**mikro** **urformen** ZIM

**Unser Profil**

Technologieangebot  
Projektpartner  
Kontakt  
KIT Login

**Unser Profil**

Das ZIM bietet eine durchgängige Prozesskette vom Prototyp bis zur Großserienfertigung von mechanisch hoch beanspruchbaren Mikrobauteilen aus Keramik und Metalllegierungen. Zentrale Fertigungsverfahren sind dabei die Mikro-Urformverfahren basierend auf dem Pulverspritzgießen und dem Feingießen. Für die industrielle Anwendung wird die gesamte Prozesskette von der Konstruktion und Simulation über die Prozessvorbereitung (Werkstoff- und Werkzeugentwicklung) und die Fertigungsverfahren bis hin zur Ermittlung der geometrischen, mechanischen und tribologischen Bauteileigenschaften bereit gestellt.

**Ziel**  
Mit dem Aufbau des Zentrums für integrierte Mikroproduktion verfolgt das KIT das Ziel, Industrie und Wissenschaft Zugang zu den im Rahmen des ehemaligen Sonderforschungsbereichs 499 entwickelten Kompetenzen im Bereich der urformenden Mikrosystemtechnik zu öffnen. Durch den vereinfachten Wissenstransfer soll die Nachhaltigkeit der Förderung erhöht werden.

**Angebot**  
Die Stärke des ZIM basiert auf der Integration und Koordination aller für ein Produktentwicklungsprojekt benötigter, hochspezialisierter Fachkompetenzen und Aktivitäten. Dadurch können Schnittstellenprobleme entweder gleich vermieden oder rechtzeitig erkannt und adressiert werden.  
Das ZIM nutzt dazu die Kompetenzen der im Folgenden aufgelisteten Institute.

**Partner**  
Das ZIM stellt im Rahmen des Innovationsclusters  $\mu$ -now! die Kompetenzen für die urformende Mikrosystemtechnik zur Verfügung.

**ZIM Dienstleistungen für die urformende Mikro-systemtechnik am KIT**

Campus Süd  
Kaiserstraße 12  
76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Peter Börsting  
IPEK • Institut für  
Produktentwicklung

Tel.: +49 721 608-45985  
Fax: +49 721 608-46051

Mail: [zim@nanomikro.kit.edu](mailto:zim@nanomikro.kit.edu)

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

**Abbildung 7.3** Homepage des Zentrums für integrierte Mikroproduktion (ZIM).

Der öffentliche Bereich bietet allgemeine Informationen zum ZIM, einen Überblick über das Technologieportfolio sowie Hinweise zu Kontaktaufnahme und Projektanfrage. Dieser Bereich richtet sich insbesondere an potentielle Projektpartner aus Industrie und Forschung.

Der interne Bereich stellt neben den Kontaktdaten der einzelnen Core-Team-Mitglieder außerdem den Zugriff auf die im Rahmen des SFB 499 entwickelten Informationssysteme sicher. So können über die zentrale ZIM-Homepage das Micro Book of Knowledge (MyBoK)<sup>493</sup>,

<sup>493</sup>Vgl. SFB 499 (2012)



der Funktionskatalog<sup>494</sup>, der Strukturkatalog<sup>495</sup>, der Micro-Feature-Katalog<sup>496</sup> sowie das Referenzprozessmodell „Mikro-Urformen“<sup>497</sup> erreicht und genutzt werden. Dadurch wird der Zugriff auf benötigte Informationen zur Angebotserstellung und Projektbearbeitung – insbesondere auch für neue Mitarbeiter – soweit wie möglich vereinfacht. Der interne Bereich richtet sich folglich an die Mitarbeiter des KIT, die im Rahmen des ZIM Projekte betreuen und bearbeiten.

Die Homepage des ZIM ist über das Internet unter der Adresse [www.zim.kit.edu](http://www.zim.kit.edu)<sup>498</sup> verfügbar.

Der präsentierte Aufbau des ZIM stellt lediglich eine Möglichkeit zur Umsetzung der organisatorischen wie auch informatrischen Integration im Sinne der Integrierten Produktentwicklung dar.

---

<sup>494</sup>Vgl. Kapitel 6

<sup>495</sup>Vgl. Schulze et al. (2009)

<sup>496</sup>Vgl. Lanza et al. (2011)

<sup>497</sup>Vgl. Abschnitt 2.7

<sup>498</sup>Vgl. Börsting (2011)



# 8 Zusammenfassung und Ausblick

## 8.1 Zusammenfassung

Ausgehend von der Entwicklung einer Mikro-Gasturbine und der Modellierung eines Referenzprozessmodells wurden Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik untersucht, die es dem Konstrukteur eines Mikrosystems erschweren, Funktions-Gestaltzusammenhänge zu synthetisieren. Diese Konstruktionsbarrieren wurden durch Abgrenzung von Technologie-, Disziplin- und Intuitionsbarriere kategorisiert. Während die Technologiebarriere aus der in der Mikrosystemtechnik notwendigen Fokussierung und Spezialisierung auf eine oder wenige Produktionstechnologien resultiert, liegt die Ursache der Disziplin- und Intuitionsbarriere in der Kognitionspsychologie des Menschen. Um diese zu verstehen, wurden zunächst weit verbreitete Modellvorstellungen zur Funktionsweise des menschlichen Erkenntnisprozesses diskutiert und in Relation gesetzt. Dabei wurde deutlich, dass verschiedene Arten von Intelligenz und Kreativität beim Menschen unterschiedlich stark ausgeprägt sind und zur Synthese von Funktions-Gestaltzusammenhängen in Abhängigkeit der Disziplin in unterschiedlichem Maße benötigt werden. Daraus ergibt sich die Disziplinbarriere, die es einem Konstrukteur erschwert, Funktions-Gestaltzusammenhänge in der Mikrosystemtechnik, in der in besonderem Maße unterschiedliche Disziplinen miteinander vereint werden, übergreifend in seiner Konstruktion zu berücksichtigen.

Auf Basis der erkenntnistheoretischen Betrachtungen wurde deutlich, dass ein Konstrukteur bei der Generierung mechanischer Funktions-Gestaltzusammenhänge ein möglichst umfassendes Gefühl für diese Zusammenhänge erlangen muss und eine gute Konstruktion stark davon abhängig ist, wie sehr sich ein Konstrukteur in der Folge in das zu erstellende System hineinversetzen kann. Dadurch werden insbesondere auf Intuition basierende Denkvorgänge unterstützt. Grundlegend für die Erlangung dieses umfassenden Gefühls ist für den Menschen dabei die Nutzung seiner Sinne. Da mikrotechnische Systeme aber generell zu klein sind, um die Sinne anzusprechen oder die Sinneswahrnehmung durch zwischengeschaltete Messgeräte, die die Funktion von „Reizwandlern“ übernehmen, stark eingeschränkt wird, entsteht dadurch die Intuitionsbarriere.

Nachdem die Ursachen bekannt waren, konnte ein Funktionskatalog als Ansatz zur Überwindung der betrachteten Konstruktionsbarrieren entwickelt werden. Die Sammlung und Klassierung von Funktions-Gestaltzusammenhängen der Mikrosystemtechnik kann prinzipiell

dabei helfen, die Technologiefokussiertheit sowie die Disziplingeprägtheit der Konstrukteure zu überwinden. Dabei werden diese Konstruktionsbarrieren mit zunehmendem Inhalt des Funktionskatalogs in immer größerem Maße abgebaut.

Die Intuitionsbarriere tritt bei der Herstellung von Funktions-Gestaltzusammenhängen sowohl bei der Analyse (Erkennen der Zusammenhänge) als auch bei der Synthese (Generieren der Zusammenhänge) mikrotechnischer Systeme auf. Während der Funktionskatalog in der Synthese nahezu keinen Einfluss auf die Intuitionsbarriere ausübt, kann er die Intuitionsbarriere in der Analyse durch die Implementierung der geometrischen Funktionsanalyse umgehen. Die geometrische Funktionsanalyse stellt den erstmals unternommenen Versuch dar, ausgehend von einer geometrischen Struktur (Bauteil, System) automatisiert auf deren Funktionsweise rückzuschließen. Die Basis hierfür bietet die geometrische Ähnlichkeitssuche, die erst seit wenigen Jahren verfügbar ist.

## 8.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Ursachen und Wirkmechanismen einiger Konstruktionsbarrieren herausgearbeitet. Dieses trägt zu einem besseren Verständnis des Konstruktionsprozesses in der Mikrosystemtechnik bei und erlaubt es, diesen Prozess zukünftig zielgerichteter durch die Entwicklung konstruktionsunterstützender Methoden und Werkzeuge zu verbessern. In Abbildung 6.1 ist erkennbar, dass die Intuitionsbarriere in der vorliegenden Arbeit nicht durch eine entsprechende Maßnahme adressiert wurde. Insbesondere im Abbau der Intuitionsbarriere sieht der Verfasser dieser Arbeit aber ein großes Potential zur Optimierung des Konstruktionsprozesses. Dieses könnte beispielsweise auf die folgenden zwei Arten geschehen:

### 8.2.1 Mikro-TRIZ-Box

Ein Ansatz hierzu könnte der Aufbau einer mikrospezifischen TRIZ-Box sein.<sup>499,500</sup> Diese könnte typische mikrospezifische Effekte in der Makrowelt nachbilden und so ein Gefühl für diese Effekte vermitteln. Beispielsweise könnte ein zentrales Problem beim Handling von Mikroteilen – eine im Vergleich zur Gewichtskraft sehr viel stärker wirkende Adhäsionskraft, die ein Platzieren von Mikrobauteilen durch einfaches Loslassen des Bauteils an der gewünschten Stelle oft unmöglich macht – modelliert werden als Klettverschluss auf den Oberflächen eines sehr leichten Schaumstoff-Makrobauteils. Der Kern des Problems wäre damit viel umfassender erfahrbar und würde sehr viel stärker in das Gefühl von Konstruk-

<sup>499</sup>Vgl. Albers et al. (2011e); vgl. Albers et al. (2011d); vgl. Albers et al. (2011f)

<sup>500</sup>Diese Idee wurde ursprünglich von ALBERS in dem wissenschaftlichen Gespräch vom 26.03.2011 mit dem Verfasser dieser Arbeit geäußert

teuren eindringen, als es durch rein rechnerische Betrachtungen und Überlegungen jemals eindringen könnte.

### 8.2.2 Immersive 3D-Reality

Ein weiterer Ansatz könnte die Darstellung mikrospezifischer Effekte mittels haptischer Technologien wie Force Feedback o.ä. und deren Einbindung in umfassende immersive 3D-Reality-Systeme darstellen. Dadurch könnte es in Zukunft möglich werden, Konturen, Oberflächenstrukturen oder die in synthetisierten Mikrosystemen wirkenden Effekte zuerspüren. Ziel wäre auch hier, dem Konstrukteur ein besseres Gefühl für Mikrosysteme zu vermitteln. Beispielsweise könnte so die Eignung unterschiedlicher Oberflächen oder Materialien als Bestandteil einer Gleitpaarung besser eingeschätzt werden.

### 8.2.3 Ausblick geometrische Funktionsanalyse

Der in dieser Arbeit erstmals realisierte Ansatz zur (teil-) automatischen geometrischen Funktionsanalyse erfordert auf dem Weg zur produktiven Nutzung eine wesentlich bessere Implementierung. Der erstellte Prototyp konnte zwar das Funktionsprinzip und die generelle Machbarkeit demonstrieren. Für eine möglichst große Anwenderakzeptanz muss die geometrische Funktionsanalyse aber viel professioneller und harmonischer in die Arbeitsabläufe implementiert werden. Erst danach kann der Konstrukteur wirkliche Unterstützung durch dieses Werkzeug erfahren. Eine Implementierung könnte z.B. so aussehen, dass auf die Repräsentation eines Mikrosystems durch Nutzung von Augmented Reality die durch die geometrische Funktionsanalyse erkannten Funktionen gemapped werden.

Die geometrische Funktionsanalyse muss nicht auf die Mikrosystemtechnik beschränkt bleiben (hier wird nur ihr Nutzen besonders deutlich), sondern könnte zukünftig generell dazu dienen, CAD-Modelle teilautomatisiert mit Funktionsinformationen zu ergänzen. Sobald nämlich die Funktionsinformation in einem CAD-Modell enthalten ist, können weitergehende Automatisierungsansätze verfolgt werden (z.B. die automatische Toleranzvergabe, die nur unter Kenntnis der zu erfüllenden Funktion sinnvoll erfolgen kann).

Das BMBF bezeichnet die Mikrosystemtechnik „[...] als so genannte 'Enabling'-Schlüsseltechnologie, die über die skalenvertikale (Nano - Mikro - Makro) und die technologieübergreifende (z. B. Biotechnologie, Nanotechnologie, Mikroelektronik) Systemintegration Anwendungsmöglichkeiten für neue Technologien und Materialien erschließt. Um diese Chancen in vollem Umfang nutzen zu können, ist es erforderlich, die technologischen Grundlagen zu sichern und kontinuierlich weiterzuentwickeln.“<sup>501</sup> Auf Basis der vorliegenden Arbeit ist es nun einsichtig, weshalb bei aller Technologiegetriebenheit der Mikrosystemtechnik der

<sup>501</sup>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit (2004), S. 12

Mensch eine stärkere Beachtung finden muss. Im Zentrum der Produktentstehung kann er mit seinen Denkweisen die Weiterentwicklung einschränken, gleichzeitig besitzt er ein enormes Potential zur Generierung zukünftiger Innovationen.

# Literaturverzeichnis

## **acatech (Hrsg.) 2012**

ACATECH (HRSG.): Faszination Konstruktion – Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel / acatech POSITION / acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Version:2012. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31931-0>. Heidelberg u. a., 2012. – Forschungsbericht. – ISBN 978–3–642–31930–3

## **Adobe Systems GmbH 2012**

ADOBE SYSTEMS GMBH: *Adobe PDF und 3D*. WorldWideWeb. [http://www.adobe.com/de/manufacturing/solutions/3d\\_solutions/](http://www.adobe.com/de/manufacturing/solutions/3d_solutions/). Version:2012. – zuletzt besucht am 26.05.2012

## **Albers 1994**

ALBERS, A.: Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik – Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In: VDI-GESELLSCHAFT ENTWICKLUNG KONSTRUKTION VERTRIEB (Hrsg.) ; VDI-Verlag, Düsseldorf (Veranst.): *Vortrag auf dem deutschen Konstrukteurstag 1994*. Fulda : VDI Verlag, 6./7. Juni 1994 1994 ( 1120), S. 73–105

## **Albers 2010**

ALBERS, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: *Proceedings of the Eighth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2010*. Ancona, Italien : Horváth, Imre, 12.-16. April 2010 (10)

## **Albers / Braun 2011a**

ALBERS, A. ; BRAUN, A.: A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. In: *International Journal of Product Development* 15 (2011), Nr. 1, S. 6–25

## **Albers / Braun 2011b**

ALBERS, A. ; BRAUN, A. ; HENNING, F. (Hrsg.) ; MOELLER, E. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 2011. – 5–30 S. – ISBN 9783446422674

## **Albers et al. 2010a**

ALBERS, A. ; BRAUN, A. ; MUSCHIK, S.: Ein Beitrag zum Verständnis des Aktivitätsbegriffs im System der Produktentstehung. In: *Proceedings of TDSE Tag des Systems Engineering 2010 München, Freising* (2010), 10.–12. November 2010. ISBN 978–3–446–42491–3

## **Albers / Börsting 2011**

ALBERS, A. ; BÖRSTING, P.: A Functions Catalogue to Support Distributed and Hybrid Micro Systems Development. In: *Proceedings of International Conference on High Aspect Ratio Micro Structure Technologies HARMST 2011*. Hsin Chu (Taiwan) & Himeji (Japan) : Chien-Chung Fu, 13.–18. Juni 2011, S. 67–68

## **Albers et al. 2010b**

ALBERS, A. ; BÖRSTING, P. ; DEIGENDESCH, T. ; ENKLER, H. ; LESLABAY, P.: Micro gear validation: improving the correlation between virtual and physical testing. In: *Microsystem Technologies* 16 (2010), Nr. 8, S. 1529–1535

## **Albers et al. 2011a**

ALBERS, A. ; BÖRSTING, P. ; MATTHIESEN, S.: Ein Funktionskatalog zur Unterstützung verteilter und hybrider Produktentstehungsprozesse in der Mikrosystemtechnik. In: VDE/VDI-GESELLSCHAFT MIKROELEKTRONIK, MIKRO- UND FEINWERKTECHNIK IM VDE (GMM) (Hrsg.): *Proceedings of MST Kongress 2011*. Berlin : VDE Verlag, 10.–12. Oktober 2011. – ISBN 978–3–8007–3367–5

## **Albers et al. 2012a**

ALBERS, A. ; BÖRSTING, P. ; MATTHIESEN, S.: Obstacles for Cognitive Analogy in Analysis and Synthesis in Microsystems Development. In: *Microsystem Technologies* (2012). – ISSN 0946–7076. – im Druck

**Albers et al. 2011b**

ALBERS, A. ; BÖRSTING, P. ; TURKI, T.: Elicitation of a reference process model for tool-based micro technologies for planning and controlling purposes and user support. In: *Microsystem Technologies* 17 (2011), S. 319–324. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-011-1254-6>. – DOI 10.1007/s00542-011-1254-6. – ISSN 0946-7076

**Albers et al. 2011c**

ALBERS, A. ; BÖRSTING, P. ; TURKI, T.: Micro Gas Turbine Development: Design Improvements using Design Patterns. In: *Micro and Nanosystems* 3 (2011), Nr. 3, S. 250–253. <http://dx.doi.org/10.2174/1876402911103030250>. – DOI 10.2174/1876402911103030250. – ISSN 1876-4029

**Albers et al. 2007**

ALBERS, A. ; BURKARDT, N. ; DEIGENDESCH, T. ; MARZ, J.: Micro-specific design flow for tool-based microtechnologies. In: *Microsystem Technologies* 13 (2007), Nr. 3–4, S. 305–310. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-006-0181-4>. – DOI 10.1007/s00542-006-0181-4

**Albers et al. 2006a**

ALBERS, A. ; BURKARDT, N. ; MEBOLDT, M.: The Karlsruhe Education Model For Product Development KaLeP in higher education. In: *Proceedings of International Design Conference DESIGN 2006*, 2006

**Albers et al. 2005a**

ALBERS, A. ; BURKARDT, N. ; MEBOLDT, M. ; SAAK, M.: SPALTEN problem solving methodology in the product development. In: *Proceedings of International Conference on Engineering Design ICED05, Melbourne, 2005*

**Albers et al. 2004**

ALBERS, A. ; BURKARDT, N. ; OHMER, M.: Principles for Design on the Abstract Level of the Contact and Channel Model C&CM. In: *Proceedings of the TMCE, Lausanne, Switzerland, 2004*

**Albers et al. 2005b**

ALBERS, A. ; BURKHARDT, N. ; OHMER, M.: Approaches for the Synthesis of Technical Systems Within the Contact and Channel Model C&CM. In: *International Conference on Engineering Design ICED 05, 2005*

**Albers et al. 2011d**

ALBERS, A. ; DEIGENDESCH, T. ; SCHMALENBACH, H.: TRIZ-box-Improving creativity by connecting TRIZ and artifacts. In: *Procedia Engineering* 9 (2011), S. 214–221

**Albers et al. 2012b**

ALBERS, A. ; DENKENA, B. ; MATTHIESEN, S. ; TECHNIKWISSENSCHAFTEN acatech Deutsche Akademie d. (Hrsg.): *Faszination Konstruktion – Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel / acatech STUDIE*. Heidelberg u. a. : Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-31930-3

**Albers et al. 2012c**

ALBERS, A. ; EBEL, B. ; LOHMEYER, Q.: Systems of Objectives in Complex Product Development. In: *Proceedings of 9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012*. Karlsruhe, Germany : I. Horváth, A. Albers, M. Behrendt and Z. Rusák, 07.–11. Mai 2012

**Albers et al. 2010c**

ALBERS, A. ; LOHMEYER, Q. ; ALINK, T.: On the importance of handling objectives in design education project work. In: *12th International Conference on Engineering and Product Design Education E&PDE 2010, Trondheim, Norway, 2010*

**Albers et al. 2011e**

ALBERS, A. ; LOHMEYER, Q. ; SCHMALENBACH, H.: TRIZ-Box in Design Education-A Study on Supporting Creativity. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Engineering and Product Design Education E&PDE11*, 2011, S. 143–148

**Albers / Marz 2003**

ALBERS, A. ; MARZ, J.: Produktionstechnische Restriktion mikrospezifischer Produktentwicklungsprozesse. (2003). <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/716525>



**Albers et al. 2003a**

ALBERS, A. ; MATTHIESEN, S. ; OHMER, M.: Alterations in Student's Ability to Solve Problems by Introduction of the Element Model C&CM into the Karlsruhe Education Model for Industrial Product Development KaLeP. In: *International Conference on Engineering Design ICED 03 Stockholm*, 2003

**Albers et al. 2003b**

ALBERS, A. ; MATTHIESEN, S. ; OHMER, M.: An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems. In: *Proceedings of 14th International Conference on Engineering Design ICED 03 (published on CD)*, 2003

**Albers / Meboldt 2007**

ALBERS, A. ; MEBOLDT, M.: A Reference Model for Product Development Processes, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: *International Conference on Engineering Design ICED 07*, 2007

**Albers et al. 2009**

ALBERS, A. ; MERKEL, P. ; GEIER, M. ; OTT, S.: Validation of powertrain systems on the example of real and virtual investigations of a dual mass flywheel in the X-in-the-Loop (XiL) environment. In: *8. Internationales CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe*. Berlin, 2009, S. 13

**Albers / Muschik 2010**

ALBERS, A. ; MUSCHIK, S.: The Role and Application of Activities in the Integrated Product Engineering Model (iPeM). In: *International Design Conference - Design 2010 International Design Conference - Design 2010*, 2010

**Albers et al. 2006b**

ALBERS, A. ; OERDING, J. ; DEIGENDESCH, T.: Product Development Regarding Micro Specific Tasks - Challenges in Designing for Production and Assembly. Kananaskis, Alberta, Canada, July 16-19 2006

**Albers et al. 2011f**

ALBERS, A. ; OHMER, M. ; ALINK, T.: Accessibility of the innovative principles to further levels of abstraction in product development. In: *Procedia Engineering* 9 (2011), S. 222–235

**Albers et al. 2002**

ALBERS, A. ; SAAK, M. ; BURKARDT, N.: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In: *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Illmenau* Bd. 23, 2002, S. 26

**Alink 2005**

ALINK, T.: *The Contact and Channel Model in the Change Prediction Method*, Universität Karlsruhe (TH), Diplomarbeit, 2005

**Alink 2010**

ALINK, T.: *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2010. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000023234>

**Allerkamp 2011**

ALLERKAMP, C.: *Die geometrische Ähnlichkeitssuche zur Identifizierung mikrotechnischer Funktionen*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diplomarbeit, 2011

**Amabile 1983**

AMABILE, T. M.: *The social psychology of creativity*. New York [u.a.] : Springer, 1983 (Springer series in social psychology). – ISBN 3–540–90830–7 ; 0–387–90830–7

**Amelang / Bartussek 1990**

AMELANG, M. ; BARTUSSEK, D.: *Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*. 3., überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Kohlhammer, 1990 (Kohlhammer-Standards Psychologie: Basisbücher und Studentexte: Teilgebiet: Differentielle Psychologie). <http://www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/339347X.pdf>. – ISBN 3–17–010747–X

**Anon 2003**

ANON: *IMMR Photo Gallery - CRM37*. WorldWideWeb. <http://www.sfu.ca/immr/gallery/crm37/index.html>. Version: 16. Dezember 2003. – zuletzt besucht am 28.05.2012

**Anon 2012a**

ANON: *Entwurfsebenen*. WorldWideWeb. [http://deposit.dbb.de/cgi-bin/dokserv?idn=1002396735&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=1002396735.pdf](http://deposit.dbb.de/cgi-bin/dokserv?idn=1002396735&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=1002396735.pdf). Version: Januar 2012. – zuletzt besucht am 25.03.2012

**Anon 2012b**

ANON: *Windchill: Den gesamten Produktlebenszyklus verwalten - vom Konzept bis zum Service*. 140 Kendrick Street Needham, MA 02494 USA: Parametric Technology Corporation (PTC), 2012. [http://de.ptc.com/WCMS/files/137799/de/6862\\_Windchill\\_Bro\\_DE\\_Final.pdf](http://de.ptc.com/WCMS/files/137799/de/6862_Windchill_Bro_DE_Final.pdf). – Produktflyer auf Homepage, besucht am 27.05.2012

**Apolin 2008**

APOLIN, M.: *Big Bang*. öbv, 2008. – 128 Seiten S. <http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&titelfamilie=Big+Bang&modul=produktdetail&isbn=3-209-04868-4>. – ISBN 9783209048684

**Aristoteles 1995**

ARISTOTELES ; SEIDL, H. H. (Hrsg.): *Über die Seele : griechisch-deutsch*. Hamburg : Meiner, 1995 (Philosophische Bibliothek ; 476). – ISBN 3–7873–1193–9

**Balzert 2001**

BALZERT, H.: *Lehrbuch der Software-Technik*. Bd. 1: Software-Entwicklung. 2. Aufl. Heidelberg : Spektrum Akad. Verl., 2001. – ISBN 3–8274–0480–0

**Bauer et al. 2010**

BAUER, W. ; MÜLLER, M. ; KNITTER, R. ; BÖRSTING, P. ; ALBERS, A. ; DEUCHERT, M. ; SCHULZE, V.: Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study. In: *Microsystem Technologies* 16 (2010), S. 607–615. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-009-0974-3>. – DOI 10.1007/s00542-009-0974-3. – ISSN 0946–7076

**Beer 1973**

BEER, S.: *Kybernetische Fuehrungslehre*. Frankfurt a. M. [u.a.] : Herder, 1973. – ISBN 3–585–32000–7

**Berchtold et al. 1997**

BERCHTOLD, S. ; KEIM, D. A. ; KRIEGEL, H. P.: Section Coding : Ein Verfahren zur Ähnlichkeitssuche in CAD Datenbanken. In: DITTRICH, K. R. (Hrsg.): *Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft: GI-Fachtagung Ulm*. Konstanz : Berlin: Springer, 5.–7. März 1997, 152–171

**Berner 2002**

BERNER, W.: *Verstand und Gefühl: Wie Logik und Intuition zusammen passen*. WorldWideWeb. <http://www.umsetzungsberatung.de/psychologie/verstand.php>. Version: 2002. – Zuletzt besucht am 20.05.2012

**Bhisitkul / Keller 2005**

BHISITKUL, R. ; KELLER, C.: Development of Microelectromechanical Systems (MEMS) forceps for intraocular surgery. In: *British journal of ophthalmology* 89 (2005), Nr. 12, S. 1586–1588

**Bühler 1907**

BÜHLER, K.: *Tatsachen und Probleme zu einer Psychologie der Denkvorgänge: Über Gedanken*. Würzburg, 1907 [http://books.google.de/books?id=v\\_qA0wAACAAJ](http://books.google.de/books?id=v_qA0wAACAAJ)

**Bibliographisches Institut GmbH 2012**

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH: *DUDEN*. WorldWideWeb. [www.duden.de](http://www.duden.de). Version: Mai 2012

**Binet / Simon 1916**

BINET, A. ; SIMON, T.: *The development of intelligence in children*. Williams & Wilkins company, 1916 ( 11)

**Birkhofer 2011**

BIRKHOFFER, H.: From design practice to design science: the evolution of a career in design methodology research. In: *Journal of Engineering Design* 22 (2011), Nr. 5, S. 333–359

**Blessing / Chakrabarti 2009**

BLESSING, L. T. M. ; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Dordrecht : Springer, 2009. – ISBN 978-1-84882-586-4

**Boehm 1988**

BOEHM, B.: A spiral model of software development and enhancement. In: *Computer* 21 (1988), Nr. 5, S. 61–72

**Bohl / Elmendorf 2008**

BOHL, W. ; ELMENDORF, W.: *Kamprath-Reihe*. Bd. 1: Aufbau und Wirkungsweise: *Strömungsmaschinen*. 10., überarb. u. erw. Aufl. Würzburg : Vogel, 2008. – ISBN 978-3-8343-3130-4

**Brader 1967**

BRADER, C.: Engpass Konstruktion. In: *Feinwerktechnik* H.1 (1967), S. 4–8

**Breig 2012**

BREIG, M.: *Presse, Kommunikation und Marketing*. WorldWideWeb. [http://www.pkm.kit.edu/2790\\_breig.php](http://www.pkm.kit.edu/2790_breig.php). Version: Mai 2012. – besucht am 19.05.2012

**Börsting 2011**

BÖRSTING, P.: *Zentrum für integrierte Mikroproduktion (ZIM)*. WorldWideWeb. [www.zim.kit.edu](http://www.zim.kit.edu). Version: 2011. – zuletzt besucht am 28.05.2012

**Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit 2004**

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF), REFERAT ÖFFENTLICHKEITSARBEIT: *Mikrosystemtechnik - Rahmenprogramm zur Förderung 2004 - 2009*. WorldWideWeb. [www.bmbf.de/pub/mikrosysteme.pdf](http://www.bmbf.de/pub/mikrosysteme.pdf). Version: 01 2004. – Zuletzt besucht am 09.04.2012

**Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit 2010**

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF), REFERAT ÖFFENTLICHKEITSARBEIT: *Hightech-Strategie – Mikrosystemtechnik*. WorldWideWeb. <http://www.bmbf.de/de/5701.php>. Version: 3 2010. – Zuletzt besucht am 13.04.2012

**CADENAS GmbH 2009**

CADENAS GMBH: *Die Geometrische Ähnlichkeitssuche*. Berliner Allee 28 b + c D-86153 Augsburg: CADENAS GmbH, März 2009. <http://www.cadenas.de/geometrische-aehnlichkeitssuche/>. – Produktflyer auf Homepage, zuletzt besucht am 27.05.2012

**CalTech 2011**

CALTECH: *A Brief MEMS History*. WorldWideWeb. <http://mems.caltech.edu/courses/EE185/00%20MEMS%20Intro.pdf>. Version: July 2011. – Zuletzt besucht am 28.07.2011

**Cattell 1971**

CATTELL, R. B.: *Abilities: their structure, growth, and action*. Houghton Mifflin, 1971

**Collins / Gentner 1987**

COLLINS, A. ; GENTNER, D.: How people construct mental models. In: HOLLAND, D. (Hrsg.) ; QUINN, N. (Hrsg.): *Cultural models in thought and language*. Cambridge University Press, 1987, S. 243–265

**Cordier 1953**

CORDIER, O.: Ähnlichkeitsbedingungen für Strömungsmaschinen. In: *Brennstoff, Wärme, Kraft* 5 (1953), S. 337

**De Bono 2005**

DE BONO, E.: *De Bonos neue Denkschule : Kreativer denken, effektiver arbeiten, mehr erreichen*. Frankfurt am Main : MVG Verl., Redline, 2005 (Train your brain). – ISBN 3-636-07069-X ; 978-3-636-07069-2

**Dechev et al. 2004**

DECHEV, N. ; CLEGHORN, W. ; MILLS, J.: *Microassembly of 3D MEMS Microstructures*. WorldWideWeb. <http://www.mie.utoronto.ca/faculty/cleghorn/projects/Microassembly/MicroassemblyMainPage.html>. Version: 2004. – Zuletzt besucht am 28.05.2012

**Deigendesch 2009**

DEIGENDESCH, T.: *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel - Creativity in Product Development and Patterns as a Methodological Means of Support*, IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut f. Technologie (KIT), Diss., 2009. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000015688>

**Dickerhof et al. 2012**

DICKERHOF, M. ; AZCARATE, S. ; TEMUN, A.: Towards an European Approach for Characterisation of Multimaterial Micromanufacturing Process Capabilities. In: *Precision Assembly Technologies and Systems* (2012), S. 200–209

**DIN EN ISO 9000 2005**

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000: 2005). In: *DIN Normen, Beuth Verlag 9000* (2005), S. 2005–12

**Dost / Herrman 2001**

*Kapitel* Entwurf und Technologie von Mikroprozessoren. In: DOST, G. ; HERRMAN, G.: *Taschenbuch Mikroprozessortechnik: mit 111 Tabellen*. 2., verb. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., 2001. – ISBN 3–446–21686–3

**Dörner 1974**

DÖRNER, D.: *Die kognitive Organisation beim Problemlösen: Versuche zu einer kybernetischen Theorie der elementaren Informationsverarbeitungsprozesse beim Denken*. Bern : Huber, 1974. – ISBN 3–456–30595–8

**Dörner 1979**

DÖRNER, D.: *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. 2. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Kohlhammer, 1979 (Kohlhammer-Standards Psychologie : Studententext : Teilgebiet Denkpsychologie). – ISBN 3–17–005517–8

**Duncker 1963**

DUNCKER, K.: *Zur Psychologie des produktiven Denkens*. unveränd. Neudr. d. Ausg. Berlin 1935. Berlin [u.a.] : Springer, 1963

**Dutke 1994**

DUTKE, S.: *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens; kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie*. Göttingen : Verl. für Angewandte Psychologie, 1994 (Arbeit und Technik ; 4). – ISBN 3–87844–111–8

**Dylla 1991**

DYLLA, N.: *Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren*. München, Techn. Univ. München, Diss., 1991

**Ehrlenspiel 2003**

EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 2., überarb. Aufl. München : Hanser, 2003. – ISBN 3–446–22119–0

**Ehrlenspiel 2007**

EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. Bd. 3., aktualisierte Aufl. Hanser, 2007

**Eigler 1994**

EIGLER, H.: *Entwurf signalverarbeitender Mikrosysteme : Einführung und Grundlagen*. Heidelberg : Hüthig, 1994. – ISBN 3–7785–2171–3

**Europäische Union 2003**

EUROPÄISCHE UNION: Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. In: *Amtsblatt der Europäischen Union vom 20* (2003), Nr. 2003, S. L124

**Eveking 2012**

EVEKING, H.: *Skriptum zur Vorlesung "Rechnersysteme I" des Fachgebiets Rechnersysteme an der TU Darmstadt*. WorldWideWeb. <http://www.rs.tu-darmstadt.de/Rechnersysteme-I.24.0.html>. Version: Februar 2012. – Zuletzt besucht am 28.05.2012

**Fatikow / Rembold 1997**

FATIKOW, S. ; REMBOLD, U.: *Microsystem technology and microrobotics*. Berlin : Springer, 1997. – ISBN 3-540-60658-0

**Fedder 1999**

FEDDER, G.: Structured design of integrated MEMS. In: *Micro Electro Mechanical Systems, 1999. MEMS'99. Twelfth IEEE International Conference on IEEE, 1999*, S. 1–8

**Federn 1970**

FEDERN, K.: Wandel in der konstruktiven Gestaltung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 42 (1970), Nr. 11, S. 729–737

**Finke et al. 1996**

FINKE, R. A. ; WARD, T. B. ; SMITH, S. M. ; WARD, T. B. (Hrsg.) ; SMITH, S. M. (Hrsg.): *Creative cognition : theory, research, and applications*. 1st pbk. ed. Cambridge, Mass, 1996. – A Bradford book.

**Fisher 1995**

FISHER, M.: *Intuition: How to Use it in Your Life*. Wildcat Publishing Company, 1995

**Frank et al. 2005**

FRANK, H. ; PHROOD ; ANONY: *Electromagnetic Wave Spectrum*. WorldWideWeb. [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Electromagnetic\\_spectrum\\_c.svg&filetimestamp=20090611090004](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Electromagnetic_spectrum_c.svg&filetimestamp=20090611090004). Version: 15 Feb 2005 and 13 Jan 2008 and 17 Mar 2008 2005–2008. – Zuletzt besucht am 12.08.2012

**Franzén et al. 1971**

FRANZÉN, O. ; OSTERHAMMEL, P. ; TERKILDSEN, K. ; ZILSTORFF, K.: What Man's Nose Tells Man's Mind - A Comparison between Sensory Scales of Odor Intensity and the Electro-Olfactogram in Man. In: OHLOFF, G. H. (Hrsg.): *Gustation and olfaction: an international symposium; Geneva, June 1970*. London [u.a.] : Acad. Press, 1971 (Food science and technology). – ISBN 0-12-524950-0, S. 87–91

**Funke 2000**

FUNKE, J.: Psychologie der Kreativität. In: HOLM-HADULLA, J. Rainer Matthias [Hrsg.] ; A. Rainer Matthias [Hrsg.] ; Assmann (Hrsg.): *Kreativität*. Berlin : Springer, 2000 (Heidelberger Jahrbücher 44). – ISBN 3-540-67757-7, S. 283–300

**Gajski / Kuhn 1983**

GAJSKI, D. ; KUHN, R.: New VLSI tools. In: *Computer* (1983), S. 11–14

**Gardner 1985**

GARDNER, H.: *Frames of the mind : the theory of multiple intelligences*. New York : Basic Books, 1985. – 395–427 S. – ISBN 0-465-02509-9 ; 0-465-02508-0

**Gardner 1996**

GARDNER, H.: *So genial wie Einstein: Schlüssel zum kreativen Denken*. Stuttgart : Klett-Cotta, 1996. – ISBN 3-608-91677-6

**Geier et al. 2009**

GEIER, M. ; STIER, C. ; DÜSER, T. ; BEHRENDT, M. ; OTT, S. ; ALBERS, A.: Simulationsgestützte Methoden – IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten. In: *ATZ Automotive Engineering Partners ATZ Automotive Engineering Partners* (2009), Nr. 2009-06, S. 48–53

**Gentner 1983**

GENTNER, D.: Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. In: *Cognitive science* 7 (1983), Nr. 2, S. 155–170

**Getzels / Jackson 1962**

GETZELS, J. ; JACKSON, P.: *Creativity and intelligence: Explorations with gifted students*. (1962)

**Giessner 1974**

GIESSNER, F.: *Gesetzmäßigkeiten und Konstruktionskataloge elastischer Verbindungen*, Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1974

**Guilford / Hoepfner 1976**

GUILFORD, J. P. ; HOEPFNER, R.: *Analyse der Intelligenz*. Weinheim [u.a.] : Beltz, 1976 (Beltz-Monographien). – ISBN 3-407-54510-X

**Heczko et al. 2002**

HECZKO, M. ; KEIM, D. A. ; SAUPE, D.: Verfahren zur Ähnlichkeitssuche auf 3D-Objekten. In: *Datenbank-Spektrum 2* (2002), Nr. 1, 54-63. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-opus-69813>

**Henderson / Clark 1990**

HENDERSON, R. ; CLARK, K.: Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. In: *Administrative science quarterly* (1990), S. 9-30

**Henrich 2002**

HENRICH, A.: *Management von Softwareprojekten*. 1. Aufl. München : Oldenbourg, 2002 (Lehr- und Handbücher der praktischen Informatik). – ISBN 3-486-25859-1

**Hentschel 2010**

HENTSCHEL, K.: Die Funktion von Analogien in den Naturwissenschaften, auch in Abgrenzung zu Metaphern und Modellen. In: HENTSCHEL, K. (Hrsg.): *Analogien in Naturwissenschaften, Medizin und Technik*, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik der Universität Stuttgart, 2010 ( 56), 13-66

**Hofstadter 2001**

HOFSTADTER, D. R.: *Analogy as the Core of Cognition*. Version:2001. <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz091734517inh.htm>. In: GENTNER, D. (Hrsg.) ; HOLYOAK, K. (Hrsg.) ; KOKINOV, B. (Hrsg.): *The analogical mind: perspectives from cognitive science*. Cambridge, Mass. [u.a.] : MIT Press, 2001 (A Bradford book). – ISBN 0-262-07206-8 ; 0-262-57139-0

**Holyoak / Thagard 1989**

HOLYOAK, K. ; THAGARD, P.: Analogical mapping by constraint satisfaction. In: *Cognitive science* 13 (1989), Nr. 3, S. 295-355

**Holyoak / Thagard 1996**

HOLYOAK, K. J. ; THAGARD, P.: *Mental leaps: analogy in creative thought*. 1. pap. ed. Cambridge, Mass. [u.a.] : MIT Press, 1996 (A Bradford book). – ISBN 0-262-08233-0 ; 0-262-58144-2978-0-262-08223-4 ; 978-0-262-58144-8

**Hsu 2008**

HSU, T.-R.: *MEMS and microsystems : design, manufacture, and nanoscale engineering*. 2. ed. Hoboken NJ : Wiley, 2008 <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz278382134cov.htm>;<http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/528126962.PDF>. – ISBN 0-470-08301-8 ; 978-0-470-08301-7. – Previous ed.: 2002

**Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig 1999**

INSTITUT FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG: *Elektronische Konstruktionskataloge (eKat)*. WorldWideWeb. <http://gina.ikmfbs.ing.tu-bs.de/ekat/Default.aspx?page=eKat>. Version: 1999-2006. – Zuletzt besucht am 10.04.2012

**Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig 2003**

INSTITUT FÜR MIKROTECHNIK, TU BRAUNSCHWEIG: *Baukasten für aktive Mikrosysteme*. WorldWideWeb. <http://www.imt.tu-bs.de/imt/institut/mitarb/boese/projekte/buble>. Version: 2003 - 2011. – Zuletzt besucht am 18.08.2012

**IVAM 2011**

IVAM: *Micro, Nano & Materials Survey 2011*. WorldWideWeb. [www.ivam-research.de](http://www.ivam-research.de). Version: 2011

**Jung 1986**

JUNG, C. G. ; NIEHUS-JUNG, M. (Hrsg.): *Gesammelte Werke*. Bd. 6: Psychologische Typen. 15. Aufl., (6. unveränd. Aufl. nach d. 9. rev. Aufl.). Olten : Walter, 1986. – ISBN 3-530-40706-2. – Literaturverz. S. 603 - 612

**Kalogerakis 2010**

KALOGERAKIS, K.: *Innovative Analogien in der Praxis der Produktentwicklung*. Wiesbaden, Technischen Universität Hamburg-Harburg, Diss., 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8674-0>. – DOI 10.1007/978-3-8349-8674-0

**Kasper 2000**

KASPER, M.: *Mikrosystementwurf : Entwurf und Simulation von Mikrosystemen; mit 44 Tabellen*. Berlin : Springer, 2000 <http://www.bsz-bw.de/cgi-bin/ekz.cgi?SWB08280372>; <http://www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/89814088.pdf>. – ISBN 3-540-66497-1

**Kimmig et al. 2011**

KIMMIG, D. ; SCHMIDT, A. ; BITTNER, K. ; DICKERHOF, M.: Modeling of Microsystems Production Processes for the MinaBASE Process Knowledge Database Using Semantic Technologies. In: *eKNOW 2011, The Third International Conference on Information, Process, and Knowledge Management*, 2011, S. 17–23

**Kleebauer 2007**

KLEEBAUR, C.: *Personalauswahl zwischen Anspruch und Wirklichkeit : wissenschaftliche Personaldiagnostik vs. erfahrungsbasiert-intuitive Urteilsfindung*. München, Universität Augsburg, Diss., 2007

**Kleinkes 2005**

KLEINKES, U.: *MST-Atlas Deutschland 2005 : Mikrosystemtechnik-Cluster in Deutschland*. Dortmund : IVAM, 2005

**Koller / Kastrup 1994**

KOLLER, R. ; KASTRUP, N.: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. Berlin : Springer, 1994. – ISBN 3-540-58243-6

**Kraft 2011**

KRAFT, O. H. ; KRAFT, O. H. (Hrsg.): Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499 / Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499. Version: 11.–12. Oktober 2011. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000024378>. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 11.–12. Oktober 2011. (KIT scientific reports ; 7591). – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-86644-747-9

**Kratt 2010**

KRATT, K.: *Microcoils manufactured with a wire bonder*, Freiburg i. Br., Dissertation, 2010. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:25-opus-77226>; <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:25-opus-77226>. – Herstellung und Charakterisierung von dreidimensionalen Mikrosolen mit einem Drahtbonder

**Krishnan / Ulrich 2001**

KRISHNAN, V. ; ULRICH, K.: Product development decisions: A review of the literature. In: *Management Science* (2001), S. 1–21

**Landau 1971**

LANDAU, E.: *Psychologie der Kreativität*. 2., verb. Aufl. München [u.a.] : Reinhardt, 1971 (Psychologie und Person ; 17). – ISBN 3-497-00548-7 ; 3-497-00557-6

**Lanza et al. 2011**

LANZA, G. ; ALBERS, A. ; KIPPENBROCK, K. ; BÖRSTING, P.: Support for Micro-Tolerancing through the Feedback of Existing Quality-Related Data to Product Developers. In: *Proceedings of EUSPEN 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology*. Como, Italy, 23.–27. Mai 2011. – ISBN 978-0-9553082-9-1

**Lehman 1980**

LEHMAN, M.: Programs, life cycles, and laws of software evolution. In: *Proceedings of the IEEE* 68 (1980), Nr. 9, S. 1060–1076

**Lietz 2009**

LIETZ, K.-J.: *Die Entscheider-Bibel*. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 2009. – ISBN 9783446416543

**Machiavelli 1986**

MACHIARELLI, N. ; RIPPEL, P. H. (Hrsg.): *Il principe = Der Fürst*. Stuttgart : Reclam, 1986 (Universal-Bibliothek ; 1219). – ISBN 3-15-001219-8. – Text ital. u. dt.

**Mainzer 1988**

MAINZER, K.: *Symmetrien der Natur: Ein Handbuch zur Natur- und Wissenschaftsphilosophie*. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 1988. – ISBN 3–11–011507–7

**Martin et al. 2007**

MARTIN, N. ; LESSMANN, S. ; VOSS, S.: Crowdsourcing: Systematisierung praktischer Ausprägungen und verwandter Konzepte. In: *Proceedings of Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2008* (2007), 1251–1263. [http://ibis.in.tum.de/mkwi08/18\\_Kooperationssysteme/05\\_Martin.pdf](http://ibis.in.tum.de/mkwi08/18_Kooperationssysteme/05_Martin.pdf)

**Marz 2005**

MARZ, J.: *Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess (my PEP) für werkzeuggebundene Mikrotechniken*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2005

**Matthiesen 2002**

MATTHIESEN, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen* Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2002

**Matthiesen 2011**

MATTHIESEN, S.: Seven years of product development in industry - experiences and requirements for supporting engineering design with 'thinking tools'. In: CULLEY, S. (Hrsg.) ; HICKS, B. (Hrsg.) ; MCALOONE, T. (Hrsg.) ; HOWARD, T. (Hrsg.) ; DONG, A. (Hrsg.) ; The Design Society (Veranst.): *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED11)* Bd. 9. Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen : The Design Society, 15.–18. August 2011, S. 236–245

**McCrae 1987**

MCCRAE, R.: Creativity, divergent thinking, and openness to experience. In: *Journal of personality and social psychology* 52 (1987), Nr. 6, S. 1258ff.

**McCrae 1994**

MCCRAE, R. R.: Openness to Experience: Expanding the boundaries of Factor V. In: *European Journal of Personality* 8 (1994), Nr. 4, S. 251–272. <http://dx.doi.org/10.1002/per.2410080404>. – DOI 10.1002/per.2410080404. – ISSN 1099–0984

**Meboldt 2008**

MEBOLDT, M.: *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung : als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. Karlsruhe, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2008

**MediaWiki.org 2012**

MEDIAWIKI.ORG: *MediaWiki*. WorldWideWeb. <http://www.mediawiki.org>. Version: Mai 2012. – Zuletzt besucht am 11.05.2012

**Menz 1997**

MENZ, J. Wolfgang ; M. Wolfgang ; Mohr: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. 2., erw. Aufl. Weinheim [u.a.] : VCH, 1997 <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/226356590.PDF>. – ISBN 3–527–29406–6 ; 3–527–29405–8

**Möhrle / Specht 2012**

MÖHRLE, M. G. ; SPECHT, D.: *Gablers Wirtschaftslexikon - Das Wissen der Experten*. WorldWideWeb. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/82800/technology-push-v4.html>. Version: Mai 2012. – zuletzt besucht am 27.05.2012

**Miller 1956**

MILLER, G.: The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. In: *Psychological review* 63 (1956), Nr. 2, S. 81

**Müller-Glaser 1997**

MÜLLER-GLASER, K.: Moderner Entwurf von Mikrosystemen. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 114 (1997), S. 475–482. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03157820>. – DOI 10.1007/BF03157820. – ISSN 0932–383X



**Nachtigall 1998**

NACHTIGALL, W.: *Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin : Springer, 1998 <http://www.bsz-bw.de/cgi-bin/ekz.cgi?SWB06624009>; <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz066240093inh.htm>; <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz066240093cov.htm>. – ISBN 3–540–63403–7

**Nachtigall 2010**

NACHTIGALL, W.: *Bionik als Wissenschaft : Erkennen - Abstrahieren - Umsetzen* (SpringerLink : Bücher)

**Neumann et al. 1978**

NEUMANN, A. ; RATHE, W. ; BÖHME, S.: *Bewertungen schmelzgeschweißter Konstruktionen, Konstruktionskatalog für Maschinenbau und Stahlbau : Entscheidungshilfen für den konstruktiven Entwicklungsprozeß gefügter Erzeugnisse*. Karl-Marx-Stadt : Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1978 (Wissenschaftliche Schriftenreihe der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt)

**NEXUS 2002**

NEXUS ; WECHSUNG, R. (Hrsg.): *Market analysis for microsystems II : 2000 - 2005; a NEXUS task force report*. Berlin : NEXUS Office, 2002

**Oerding 2009**

OERDING, J.: *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung : Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM*, IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2009. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000013689>

**Ohloff 1990**

OHLOFF, G.: *Riechstoffe und Geruchssinn : die molekulare Welt der Düfte; mit 16 Tab.* Berlin : Springer, 1990 <http://www.gbv.de/dms/bs/toc/025359002.pdf>. – ISBN 3–540–52560–2 ; 0–387–52560–2

**Ortloff 2006**

ORTLOFF, D.: *Product engineering for silicon based MEMS IP*, Universität Siegen, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Dissertation, 2006

**Pahl 1967**

PAHL, G.: Entwurfsingenieur und Konstruktionslehre unterstützen die moderne Konstruktionsarbeit. In: *Konstruktion* 19 (1967), S. 343

**Pahl et al. 2005**

PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. ; PAHL, G. (Hrsg.): *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. 6. Aufl. Berlin : Springer, 2005. – ISBN 3–540–22048–8

**Park / Allen**

PARK, J. ; ALLEN, M. G.: *Magnetic Devices Research*. WorldWideWeb. <http://mems.mirc.gatech.edu/research/magnetic.html>. – Zuletzt besucht am 28.05.2012

**Pawlowski 1971**

PAWLOWSKI, J.: *Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung: Grundlagen und Anwendung*. Berlin : Springer, 1971. – ISBN 3–540–05227–5 ; 0–387–05227–5

**Peterson / Carson 2000**

PETERSON, J. B. ; CARSON, S.: Latent Inhibition and Openness to Experience in a high-achieving student population. In: *Personality and Individual Differences* 28 (2000), Nr. 2, S. 323 – 332. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8869\(99\)00101-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8869(99)00101-4). – DOI 10.1016/S0191-8869(99)00101-4. – ISSN 0191–8869

**Peterson et al. 2002**

PETERSON, J. B. ; SMITH, K. W. ; CARSON, S.: Openness and extraversion are associated with reduced latent inhibition: replication and commentary. In: *Personality and Individual Differences* 33 (2002), Nr. 7, S. 1137 – 1147. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00004-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00004-1). – DOI 10.1016/S0191-8869(02)00004-1. – ISSN 0191–8869

**Popp et al. 2004**

POPP, J. ; WAGENER, A. ; ORTLOFF, D. ; BEUNDER, M.: A Novel Approach Towards Standardization of MEMS Process Development. In: *Proceedings COMS2004, Edmonton* (2004)

**Qiao 2003**

QIAO, F.: *Biologisch inspirierte mikrotechnische Werkzeuge für die Mikromontage und die Minimal-Invasive Chirurgie*, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Ph. D. thesis, 2003

**Rammig 1989**

RAMMIG, F. J.: *Systematischer Entwurf digitaler Systeme : von der System- bis zur Gatter-Ebene*. Stuttgart : Teubner, 1989 (Leitfäden und Monographien der Informatik). – ISBN 3–519–02265–6

**Redtenbacher 1859**

REDTENBACHER, F. ; REDTENBACHER, F. (Hrsg.): *Principien der Mechanik und des Maschinenbaues*. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/UB-Bestand/65>. Version:2. Aufl., 1859

**ReeseOnline e.K. 2012**

REESEONLINE E.K.: <http://www.fremdwort.de>. WorldWideWeb. <http://www.fremdwort.de>. Version: Mai 2012

**Reid 2000**

REID, R. C.: Sensory systems. Version:2000. <http://ebooks.ub.uni-muenchen.de/19706/>. In: KAZDIN, A. E. (Hrsg.): *Encyclopedia of psychology, Vol. 7*. Oxford University Press, 2000

**Reid / Yau 2003**

REID, R. C. ; YAU, K.-W.: Sensory systems. In: *Current Opinion in Neurobiology* 13 (2003), Nr. 4, S. 401 – 403. [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-4388\(03\)00106-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-4388(03)00106-5). – DOI 10.1016/S0959–4388(03)00106–5. – ISSN 0959–4388

**Reynolds 1927**

REYNOLDS, O.: Über die Theorie der Schmierung und ihre Anwendung auf Herrn Beauchamp Towers Versuche. In: PETROV, N. P. (Hrsg.) ; HOPF, L. H. (Hrsg.): *Abhandlungen über die hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung*. Leipzig : Akad. Verlagsges., 1927 (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften ; 218), S. 39–107

**Rhodes 1961**

RHODES, M.: An analysis of creativity. In: *The Phi Delta Kappan* 42 (1961), Nr. 7, S. 305–310

**Rodenacker 1991**

RODENACKER, W. G.: *Methodisches Konstruieren : Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele*. 4., überarb. Aufl. Berlin : Springer, 1991 (Konstruktionsbücher; 27). <http://www.bsz-bw.de/cgi-bin/ekz.cgi?SWB02560457>. – ISBN 3–540–53977–8 ; 0–387–53977–8

**Roth 1982**

ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Systematisierung und zweckmäßige Aufbereitung technischer Sachverhalte für das methodische Konstruieren; mit 38 Konstruktionskatalogen u. 476 Definitionen von Fachbegriffen*. Berlin : Springer, 1982 <http://www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/18005500.pdf>. – ISBN 3–540–09815–1 ; 0–387–09815–1

**Royce 1970**

ROYCE, W.: Managing the development of large software systems. In: *proceedings of IEEE WESCON* Bd. 26 Los Angeles, 1970

**Saggino 2000**

SAGGINO, A.: The Big Three or the Big Five? A replication study. In: *Personality and Individual Differences* 28 (2000), Nr. 5, S. 879 – 886. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8869\(99\)00146-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8869(99)00146-4). – DOI 10.1016/S0191–8869(99)00146–4. – ISSN 0191–8869

**Sagoo et al. 2009**

SAGOO, J. ; TIWARI, A. ; ALCOCK, J.: A Descriptive Model of the Current Microelectromechanical Systems (MEMS) Development Process. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09), Vol. 1*, 2009, S. 607

**Schneider 1986**

SCHNEIDER, J.: *Konstruktionskataloge als Hilfsmittel bei der Entwicklung von Antrieben*. Darmstadt [u.a.], TH Darmstadt, Diss., 1986

**Schubert 2010**

SCHUBERT, G.: *Einsatz von Ähnlichkeitsmaßen zum Vergleich von Bauteileigenschaften*. Grin Verlag, 2010. – ISBN 9783640717019

**Schulze et al. 2009**

SCHULZE, V. ; DEUCHERT, M. ; KIENZLER, A. ; RUHS, C. ; WEBER, P.: Prozessübergreifende Betrachtung abtragender Verfahren zur Mikroformeinsetzungsherstellung. In: VOLLERTSEN, F. (Hrsg.) ; BÜTTGENBACH, S. (Hrsg.) ; KRAFT, O. (Hrsg.) ; MICHAELI, W. (Hrsg.): *Proceedings zum 4. Kolloquium Mikroproduktion 2009 Bremen*. Bremen : BIAS Verlag, 2009

**Schumpeter 1961**

SCHUMPETER, J. A.: *Grundriß der Sozialwissenschaft ; [4]*. Bd. 1.: *Konjunkturzyklen*. Göttingen : Vandenhoeck & Ruprecht, 1961

**Schwarz et al. 1996**

SCHWARZ, P. ; ECCARDT, P. ; SCHULTE, S. ; PAAP, K. ; GUTZMANN, M.: Methoden und Werkzeuge zur Simulation von Mikrosystemen. In: *Proc. 4. Workshop "Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikro-systementwurf"* Bd. 18, 1996, S. 19–29

**Schweinberger 2000**

SCHWEINBERGER, D.: *Konstruktionskataloge*. WorldWideWeb. [http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/nkoka\\_b.html](http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/nkoka_b.html). Version: September 2000. – Zuletzt besucht am 10.04.2012

**Schweizer 1989**

SCHWEIZER, P.: *Systematische Produkt-Entwicklung mit Mikroelektronik : technische und psychosoziale Erfolgsstrategien*. Thun : Ott, 1989 <http://www.bsz-bw.de/cgi-bin/ekz.cgi?SWB01941768>. – ISBN 3–7225–6645–2 ; 3–18–400926–2

**Schwenker 1806**

SCHWENKER, B.: *Transformator*. WorldWideWeb. <http://vlex.physik.uni-oldenburg.de/42370.html>. Version: 18.06.2010. – zuletzt besucht am 28.05.2012

**Schwesinger et al. 2009**

SCHWESINGER, N. ; DEHNE, C. ; ADLER, F.: *Lehrbuch Mikrosystemtechnik: Anwendungen, Grundlagen, Materialien und Herstellung von Mikrosystemen*. München : Oldenbourg, 2009 <http://d-nb.info/986438359/04>. – ISBN 978–3–486–57929–1 ; 3–486–57929–0

**SFB 499 2011**

SFB 499: *Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen*. WorldWideWeb. [www.sfb499.de](http://www.sfb499.de). Version: July 2011. – Zuletzt besucht am 23.08.2012

**SFB 499 2012**

SFB 499: *MyBoK - Micro Book of Knowledge*. WorldWideWeb. <https://wiki.ipek.uni-karlsruhe.de/mybok/doku.php>. Version: Januar 2012. – Zuletzt besucht am 27.04.2012

**Shah et al. 2003**

SHAH, J. ; SMITH, S. ; VARGAS-HERNANDEZ, N.: Metrics for measuring ideation effectiveness. In: *Design Studies* 24 (2003), Nr. 2, S. 111–134

**Smith et al. 2011**

SMITH, S. M. ; LINSEY, J. S. ; KERNE, A.: Using Evolved Analogies to Overcome Creative Design Fixation. Version: 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-224-7-6>. In: TAURA, T. (Hrsg.) ; NAGAI, Y. (Hrsg.): *Design Creativity 2010*. Springer London, 2011. – DOI 10.1007/978–0–85729–224–7–6. – ISBN 978–0–85729–224–7, S. 35–39

**Sneed et al. 2005**

SNEED, H. M. ; HASITSCHKA, M. ; TEICHMANN, M.-T.: *Software-Produktmanagement: Wartung und Weiterentwicklung bestehender Anwendungssysteme*. 1. Aufl. Heidelberg : dpunkt-Verl., 2005. – ISBN 3–89864–274–7

**Sommerville 2007**

SOMMERVILLE, I.: *Software Engineering*. 8., aktualisierte Aufl. München [u.a.] : Pearson Studium, 2007 (it : Informatik). <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz262039893cov.htm>; <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz262039893inh.htm>. – ISBN 3–8273–7257–7 ; 978–3–8273–7257–4

**Spearman 1904**

SPEARMAN, C.: General Intelligence, Objectively Determined and Measured. In: *The American Journal of Psychology* 15 (1904), Nr. 2, S. 201–292

**SPIEGEL ONLINE 2007**

SPIEGEL ONLINE: *Intuition – Die Macht des Unbewussten*. WorldWideWeb. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,479900,00.html>. Version: 28. April 2007. – Besucht am 20.05.2012

**Stachowiak 1973**

STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien [u.a.] : Springer, 1973 <http://digitool.hbz-nrw.de:1801/webclient/DeliveryManager?pid=3000423>. – ISBN 3–211–81106–0 ; 0–387–81106–0

**Sternberg 1995**

STERNBERG, R.: *In search of the human mind*. Harcourt Brace College Publishers, 1995

**Sternberg / Lubart 1999**

STERNBERG, R. ; LUBART, T.: The concept of creativity: Prospects and paradigms. In: *Handbook of creativity* (1999), S. 3–15

**Sternberg 2004**

STERNBERG, R. J. ; WILSON, J. F. (Hrsg.): *Psychology*. 4th ed. Belmont, CA : Thomson/Wadsworth, 2004 <http://www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/134411250.pdf>. – ISBN 0–534–61812–X ; 0–534–61820–0

**Sternberg 2006**

STERNBERG, R. J.: *Cognitive psychology*. 4. ed., internat. student ed. Belmont : Thomson Wadsworth, 2006. – ISBN 0–495–00699–8 ; 0–534–51421–9

**Triltsch / Büttgenbach 2008**

TRILTSCH, U. ; BÜTTGENBACH, S.: TCAD tool for innovative MEMS and MOEMS: an all-in-one solution. In: *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2008, S. 68820G–1

**Trimmer**

TRIMMER, W.: *A Tutorial on Micromechanics and MEMS*. WorldWideWeb. <http://home.earthlink.net/~trimmerw/mems/tutorials.html>. – Zuletzt besucht am 12.04.2012

**Tversky 1977**

TVERSKY, A.: Features of similarity. In: *Psychological review* 84 (1977), Nr. 4, S. 327

**Universität Duisburg-Essen 2012**

UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN: *Neurobiologische Grundlagen des Lernens*. WorldWideWeb. <http://www.uni-due.de/edit/lp/common/bio.htm>. Version: April 2012. – Zuletzt besucht am 12.05.2012

**VDA 4 2006**

VDA 4: *Produkt- und Prozess FMEA*. 2., überarb. Aufl. Oberursel : VDA QMC, 2006

**VDI 2206 2004**

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. In: *VDI-Richtlinien* (2004)

**VDI 2221 1993**

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. In: *VDI-Richtlinien* (1993)

**Versteegen 2000**

VERSTEEGEN, G. ; VERSTEEGEN, G. H. (Hrsg.): *Das V-Modell in der Praxis : Grundlagen, Erfahrungen, Werkzeuge*. 1. Aufl. Heidelberg : dpunkt-Verl., 2000. – ISBN 3–932588–39–8

**Völckers 1977**

VÖLCKERS, U.: *Wiederverwenden konstruktiver Lösungen durch Aufbau firmenspezifischer Konstruktionskataloge*, TU Braunschweig, Diss., 1977

**Vollmer 2011**

VOLLMER, I.: Im Mittelpunkt steht der Mensch. In: *LookKIT. Das Magazin für Forschung, Lehre, Innovation*. 1 (2011), Nr. 1, 24–25. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000029049>

**Wagener / Hahn 2003**

WAGENER, A. ; HAHN, K.: Eine Entwurfsmethodik für die Mikrosystemtechnik und Post-CMOS. In: *Proc. Austrochip*, 2003

**Wagener et al. 2002**

WAGENER, A. ; POPP, J. ; HAHN, K. ; BRÜCK, R.: Requirements to a physical design support tool for microsystem technology. In: *Proc. of the 14th European Simulation Symposium and Exhibition, Dresden, Germany*, 2002, S. 18–28

**Walker / Thomas 1985**

WALKER, R. A. ; THOMAS, D. E.: A model of design representation and synthesis. In: *Proceedings of the 22nd ACM/IEEE Design Automation Conference*. Piscataway, NJ, USA : IEEE Press, 1985 (DAC '85). – ISBN 0–8186–0635–5, 453–459

**Wallas 1926**

WALLAS, G.: *The art of thought*. Bd. 136. London : J. Cape, 1926. – 320ff. S.

**Watty 2006**

WATTY, R.: *Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik*. Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Diss., 2006. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-28861>

**Weber**

WEBER, P.: *mikro-now! Dienstleistungen für Mikrotechnologie am KIT*. WorldWideWeb. <http://mikro-now.nanomikro.kit.edu/>. – Zuletzt besucht am 28.05.2012

**Weidenmann 1988**

WEIDENMANN, B.: *Psychische Prozesse beim Verstehen von Bildern*. 1. Aufl. Bern [u.a.] : Huber, 1988 (Huber-Psychologie-Forschung). <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz013665944inh.htm>. – ISBN 3–456–81667–7

**Weinreuter 2011**

WEINREUTER, C.: *Aufbau eines Funktionskatalogs für die Mikrosystemtechnik*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diplomarbeit, 12 2011

**Wer liefert was? GmbH 2012**

WER LIEFERT WAS? GMBH: *Wer liefert was?* WorldWideWeb. [www.wlw.de](http://www.wlw.de). Version: Mai 2012. – Zuletzt besucht am 30.03.2012

**Werkmann-Karcher / Rietiker 2010**

WERKMANN-KARCHER, B. ; RIETIKER, J. ; WERKMANN-KARCHER, B. H. (Hrsg.): *Angewandte Psychologie für das Human Resource Management : Konzepte und Instrumente für ein wirkungsvolles Personalmanagement*. Berlin : Springer, 2010 <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz32101118Xinh.htm>; [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3439821&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3439821&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm). – ISBN 978–3–642–12480–8

**Wicht / Bouchaud 2005**

WICHT, H. ; BOUCHAUD, J. ; WICHT, H. (Hrsg.): *Market analysis for MEMS and microsystems 3: 2005 - 2009; a NEXUS task force report*. Grenoble : NEXUS Assoc., 2005. – ISBN 2–9518607–2–2

**Wildermuth 2011**

WILDERMUTH, C.: *Ableitung und Darstellung des Referenzmodells des mikrospezifischen Produktentstehungsprozesses für werkzeuggebundene Mikrotechniken*. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diplomarbeit, Juli 2011

**Wohland / Wiemeyer 2006**

WOHLAND, G. ; WIEMEYER, M.: *Denkwerkzeuge für dynamische Märkte : Ein Wörterbuch*. 1. Aufl. Münster, Westf. : Monsenstein und Vannerdat, 2006. – ISBN 3–86582–394–7 ; 978–3–86582–394–6

**Zec 2012**

ZEC, M.: *Zusammenhang zwischen Kreativität und Intelligenz*. World-WideWeb. <http://kreativitätstechniken.info/was-ist-kreativitaet/zusammenhang-zwischen-kreativitaet-und-intelligenz/>. Version: Mai 2012. – Zuletzt besucht am 13.05.2012

# **A Referenzprozessmodell „Mikro-Urformen“**

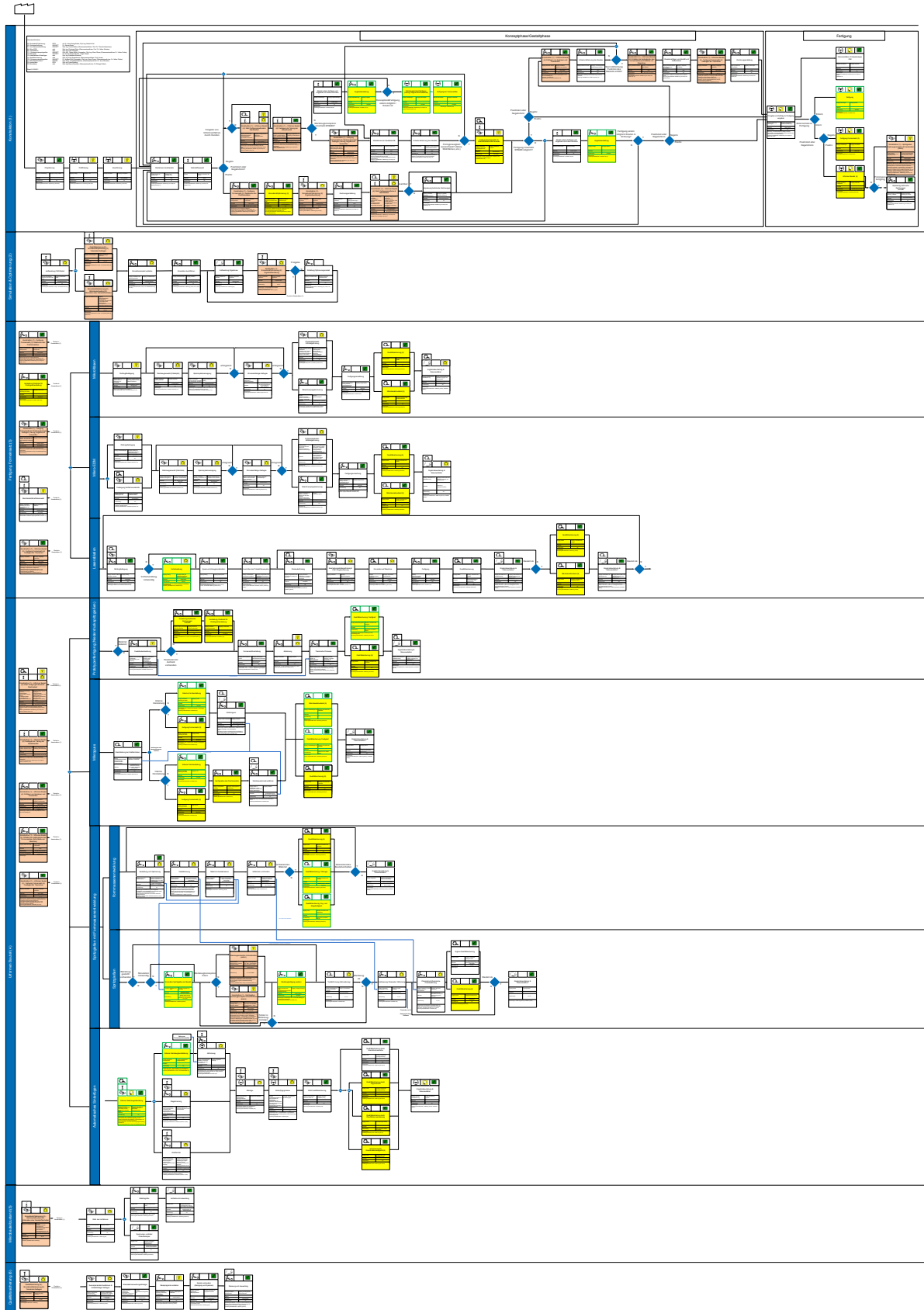


Abbildung A.1 Referenzprozessmodell Mikrourformen



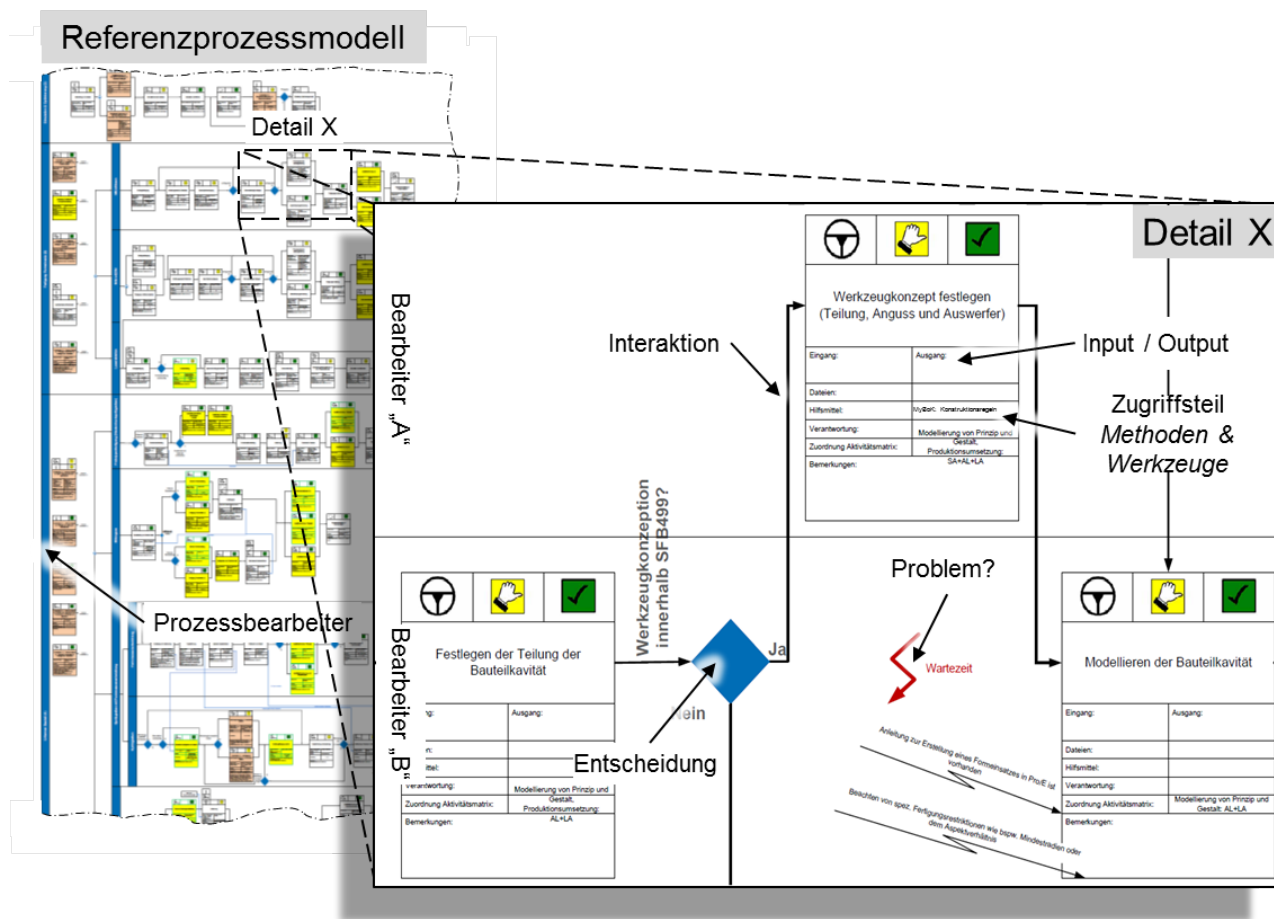


Abbildung A.2 Legende zum Referenzprozessmodell Mikro-Urformen.

# Lebenslauf

## Angaben zur Person

Geburtsdatum 17. Juli 1979  
Geburtsort: Ahaus i. Westf.  
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder  
Nationalität: deutsch

## Berufserfahrung

11/2007 – 10/2012 Akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), ehem. Universität Karlsruhe (TH)  
07/2002 – 09/2002 Anstellung als Technischer Zeichner bei der Firma  
Finnah Engineering & Packaging GmbH, Ahaus  
08/2000 – 06/2002 Ausbildung zum Technischer Zeichner (Maschinen- und Anlagentechnik) bei  
der Firma Finnah Engineering & Packaging GmbH, Ahaus  
09/1999 – 06/2000 Wehrdienst beim 3./ Instandsetzungsbataillon 7 der Bundeswehr, Wesel

## Schulbildung, Studium, Promotion

10/2012 Promotion zum Thema: *Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik*  
04/2007 – 09/2007 Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe (TH) und University of  
Cambridge/UK, Willy-Höfler-Preis: beste Diplomarbeit im Bereich  
Maschinenkonstruktionslehre im Jahr 2007  
01/2006 – 04/2006 Studienarbeit am Department of Machine Design der Königlich Technischen  
Hochschule (KTH) Stockholm in Kooperation mit dem schwedischen  
Unternehmen LightLift eSystems AB  
08/2005 – 05/2006 Auslandsstudium Maschinenbau an der KTH Stockholm, Schweden  
10/2002 – 09/2007 Studium Maschinenbau (Vertiefung Produktentwicklung & Konstruktion) an  
der Universität Karlsruhe (TH), Hauptfächer: „Integrierte Produktentwicklung“,  
„Rotor- und Kreiseldynamik, Maschinendynamik, Kontinuumsschwingungen“  
08/2000 – 06/2002 Kooperatives Studium Maschinenbau an der Fachhochschule Gelsenkirchen,  
Abteilung Bocholt  
08/1990 – 06/1999 Alexander-Hegius-Gymnasium, Ahaus