

**Fachgebiet Konstruktionstechnik
und Entwicklungsmethodik**

**Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in
frühen Phasen der Produktentwicklung**

Dipl.-Ing. Bernd Bender

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme der
Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –**

genehmigten Dissertation.

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. habil. Klaus-Peter Timpe

Berichterin: Prof. Dr.-Ing. Lucienne T. M. Blessing

Berichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker (TU Dresden)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 23. April 2004

Berlin 2004
D 83

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Bernd Bender,
Berlin

Nr. 377

**Erfolgreiche individuelle
Vorgehensstrategien
in frühen Phasen der
Produktentwicklung**

VDI Verlag

Bender, Bernd

Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 377. Düsseldorf: VDI Verlag 2004.

288 Seiten, 116 Bilder, 63 Tabellen.

ISBN 3-18-337701-2, ISSN 0178-949X,

€ 81,00 / VDI-Mitgliederpreis € 72,90.

Für die Dokumentation: Konstruktionsmethodik – Produktentwicklung – Design Problem Solving – Problemlösestrategien – Handlungsregulierung – Vorgehensmodellierung – Expertenkönnen – Konstruktionsausbildung

Der Mensch als kreativer Problemlöser steht im Mittelpunkt erfolgreicher Produktentwicklungsprozesse. Konstruktionsmethodische Vorgehensempfehlungen sollen ihn bei der Bewältigung seiner kognitiv hoch anspruchsvollen Aufgaben unterstützen. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage, in welchem Maße diese Empfehlungen geeignet sind, das Entwurfshandeln und dessen Ergebnisse tatsächlich zu verbessern. In einer umfangreichen empirischen Studie wurde deshalb untersucht, welche individuellen Vorgehensweisen den Konstruktionserfolg messbar erhöhen. Im Ergebnis konnten erfolgreiche und weniger erfolgreiche Vorgehensweisen eindeutig differenziert werden. Dieses führt auf grundlegend neue Modellvorstellungen vom erfolgreichen individuellen Vorgehen im Prozess der Produktentwicklung, zu einer Re-Interpretation der Konzeptphase als einen erfahrungsbasierten, iterativen Lernprozess.

Die Reihen der FORTSCHRITT-BERICHTS VDI:

- | | |
|--|--|
| 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente | 13 Fördertechnik/Logistik |
| 2 Fertigungstechnik | 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik |
| 3 Verfahrenstechnik | 15 Umwelttechnik |
| 4 Bauingenieurwesen | 16 Technik und Wirtschaft |
| 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe | 17 Biotechnik/Medizintechnik |
| 6 Energietechnik | 18 Mechanik/Bruchmechanik |
| 7 Strömungstechnik | 19 Wärmetechnik/Kältetechnik |
| 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik | 20 Rechnerunterstützte Verfahren
(CAD, CAM, CAE, CAP, CAQ, CIM, . . .) |
| 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik | 21 Elektrotechnik |
| 10 Informatik/Kommunikation | 22 Mensch-Maschine-Systeme |
| 11 Schwingungstechnik | |
| 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik | |

D 83

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2004

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 3-18-337701-2

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik der Technischen Universität Berlin in den Jahren 1997 bis 2003.

Mein Dank gilt zunächst den Beteiligten am Promotionsverfahren: Prof. Dr.-Ing. Lucienne Blessing führte nach ihrer Berufung an das Fachgebiet das schon begonnene Forschungsprojekt mit viel Elan weiter und begleitete meine Arbeit engagiert und mit dem größten Wohlwollen. Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker hatte als Berichterstatter aus dem Bereich der kognitiven Psychologie einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit. Ich erinnere mich gerne an viele Diskussionen, die meinen Horizont als Ingenieur erweitern halfen. Mein Dank gilt schließlich auch Prof. Dr. rer. nat. habil. Klaus-Peter Timpe für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsverfahren.

Danken möchte ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet für die angenehme Zeit und wertvolle Unterstützung. Viele von ihnen wirkten tatkräftig mit bei der Organisation und Durchführung der empirischen Untersuchungen. Auch den fest angestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus Sekretariat, Bibliothek und Versuchsfeld bin ich für ihre Unterstützung zu großem Dank verpflichtet, ebenso wie den insgesamt 71 Studentinnen und Studenten, die als Versuchspersonen an den Studien teilnahmen.

Eine Herausforderung stellte die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit meinem Dresdener Kollegen Frank Pietzcker für mich dar. Für diese überaus positive persönliche Erfahrung, für viele engagierte Diskussionen und für seinen Beitrag zur Lösung einiger über die Disziplinengrenzen hinweg ebenso engagiert ausgetragener Konflikte sei auch ihm herzlich gedankt.

Der Weg in die Welt der Wissenschaft war mir nicht in die Wiege gelegt. Großer Dank gilt deshalb meinen Eltern, die mich auf diesem Weg unterstützt haben.

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Wolfgang Beitz verstarb leider viel zu früh. Mit ihm verband mich mehr als nur das Verhältnis zwischen „Chef“ und Mitarbeiter, zwischen Lehrer und Schüler. Wolfgang Beitz beeindruckte mich durch seine wissenschaftliche Leistung, seine starke Persönlichkeit, seine innere Unabhängigkeit und seine Bereitschaft, auch selbst errichtete Denkgebäude wieder umzubauen oder einzureißen, wenn ihm dies notwendig erschien. Ihm und seinem Lebenswerk ist diese Arbeit gewidmet.

Den persönlichsten und größten Dank möchte ich meiner Frau – und ehemaligen Kollegin – Beate aussprechen. Ohne sie wäre diese Arbeit nie entstanden. Sie weiß, was sie mir bedeutet.

„Die alte Technische Hochschule ist tot, und an ihrer Stelle ersteht eine neue Institution mit neuen Zielen. Der Sinn dieses Namenswechsels ist einfach, aber von größter Bedeutung. Sie sollten von ihm lernen, dass jede Erziehung, technisch, humanistisch oder was immer, universal sein muss, d.h. sie muss den ganzen Menschen, die ganze Persönlichkeit angehen, und ihre erste Aufgabe ist die Heranbildung eines Menschen im vollen Sinne, der in der Lage ist, eine verantwortliche Stellung im Leben neben seinen Mitmenschen einzunehmen.“

Major-General Eric P. Nares,
Kommandeur der britischen Truppen in Berlin,
anlässlich der Neugründung der TU Berlin am 09. April 1946

Inhalt

1	EINLEITUNG UND ZIELE	1
1.1	ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSANSATZ	3
1.1.1	<i>Leitbild</i>	4
1.1.2	<i>Forschungsfragen</i>	8
1.2	AUFBAU DER ARBEIT	10
1.3	ANMERKUNGEN ZU SPRACHE UND FORM DER ARBEIT	11
2	METHODISCHE PRODUKTENTWICKLUNG	12
2.1	DIE KONSTRUKTIONSMETHODIK: EIN PRÄSKRIPTIVES VORGEHENSMODELL	13
2.2	ANWENDBARKEIT UND AKZEPTANZ PRÄSKRIPTIVER KONSTRUKTIONSMETHODIK	39
2.3	KOGNITIONSPSYCHOLOGISCHE GRUNDLAGEN DES KONSTRUIERENS	47
2.3.1	<i>Konstruieren als Problemlösen: Design Problem Solving</i>	50
2.3.2	<i>Strategien zur Lösung von Problemen</i>	54
2.3.3	<i>Kann man Konstruieren lernen? Der Erwerb von Expertenwissen und Expertenkönnen</i>	57
3	EMPIRISCHE UNTERSUCHUNGEN DES ENTWURFSHANDELNS	62
3.1	DESKRIPTIVE KONSTRUKTIONSFORSCHUNG IM INTERNATIONALEN KONTEXT	62
3.2	DESKRIPTIVE KONSTRUKTIONSFORSCHUNG IN DEUTSCHLAND	85
3.3	ZUSAMMENFASSUNG: MERKMALE REALEN ENTWURFSHANDELNS	101
3.4	UNTERSUCHUNGSZIELE UND HYPOTHESEN	106
3.4.1	<i>Prozessmodellierung für die Konzeptphase</i>	108
3.4.2	<i>Prozessmodellierung für die Vorentwurfsphase</i>	110
3.4.3	<i>Hypothetische Vorgehenstypen für die Vorentwurfsphase</i>	112
3.4.4	<i>Hypothesen zum Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte</i>	114
3.4.5	<i>Hypothesen zum Ausbildungseinfluss auf das tatsächlich zu beobachtende Vorgehen</i>	114
3.4.6	<i>Hypothesen zum Einfluss des tatsächlich beobachteten Vorgehens auf die Lösungsgüte</i>	115
4	LABORSTUDIE: AUSBILDUNG, VORGEHEN, KONSTRUKTIONSERFOLG	117
4.1	UNTERSUCHUNGSDESIGN	117
4.1.1	<i>Anforderungen an das Untersuchungsdesign</i>	117
4.1.2	<i>Aufbau und Ablauf der Untersuchung</i>	121
4.1.3	<i>Auswahl der Versuchspersonen</i>	124
4.1.4	<i>Auswahl und Standardisierung der Versuchsaufgaben</i>	127
4.2	METHODIK FÜR DIE VORGEHENSBEOBSACHTUNG	135
4.2.1	<i>Vorgehensbeobachtung in der Konzeptphase</i>	138
4.2.2	<i>Vorgehensbeobachtung in der Vorentwurfsphase</i>	139
4.3	METHODIK FÜR DIE VORGEHENSANALYSE	142

4.3.1	<i>Vorgehensanalyse in der Konzeptphase</i>	143
4.3.2	<i>Vorgehensanalyse in der Vorentwurfsphase</i>	145
4.4	METHODIK FÜR DIE LÖSUNGSGÜTEBEURTEILUNG.....	150
4.4.1	<i>Lösungsgüte in der Konzeptphase</i>	152
4.4.2	<i>Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase</i>	158
4.5	DATENAUSWERTUNG UND STATISTISCHE TESTMETHODEN.....	163
4.5.1	<i>Gefordertes Signifikanzniveau und Effektstärken</i>	165
5	ERGEBNISSE DER LABORSTUDIE	167
5.1	AUSBILDUNGSEINFLUSS AUF DIE QUALITÄT DER KONSTRUKTIONSERGEBNISSE.....	167
5.1.1	<i>Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte in der Konzeptphase</i>	167
5.1.2	<i>Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase</i>	171
5.2	AUSBILDUNGSEINFLUSS AUF DAS TATSÄCHLICH BEOBACHTETE VORGEHEN.....	173
5.2.1	<i>Ausbildungseinfluss auf das Vorgehen in der Konzeptphase</i>	174
5.2.2	<i>Ausbildungseinfluss auf das Vorgehen in der frühen Entwurfsphase</i>	186
5.3	EINFLUSS DES TATSÄCHLICH BEOBACHTETEN VORGEHENS AUF DIE QUALITÄT DER KONSTRUKTIONSERGEBNISSE.....	195
5.3.1	<i>Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte in der Konzeptphase</i>	195
5.3.2	<i>Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte in der frühen Entwurfsphase</i>	206
5.4	ZUSAMMENFASSUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE.....	216
6	SYNTHESE: KONZIPIEREN UND ENTWERFEN ALS LERNPROZESS	219
6.1	OPPORTUNISTISCHE HANDLUNGSSTEUERUNG: POTENZIALE UND GRENZEN.....	220
6.2	KONZIPIEREN UND ENTWERFEN ALS ZIELGERICHTETER LERNPROZESS: EINE RE-INTERPRETATION DER KONZEPTPHASE.....	223
6.3	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE KONSTRUKTIONSAUSBILDUNG.....	227
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	232
7.1	KONSTRUKTIONSMETHODIK UND REALE ENTWURFSPROZESSE: EIN GEGENSATZ? ..	232
7.2	ERGEBNISSE DER LABORSTUDIE.....	233
7.3	KONZIPIEREN UND ENTWERFEN ALS ZIELGERICHTETER LERNPROZESS.....	234
7.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE KONSTRUKTIONSMETHODISCHE AUSBILDUNG.....	235
7.5	AUSBLICK.....	236
8	ANHANG	237
8.1	KONSTRUKTIONSAUFTRÄGE AUS DER LABORSTUDIE.....	237
8.1.1	<i>Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase</i>	237
8.1.2	<i>Konstruktionsaufträge für die Vorentwurfsphase</i>	240
8.2	KODIERUNGSHILFEN FÜR DIE VORGEHENSANALYSE.....	246
8.2.1	<i>Kodierungshilfe für die Vorgehensanalyse in der Konzeptphase</i>	246
8.2.2	<i>Kodierungsleitfaden für die Vorentwurfsphase</i>	260
9	LITERATUR	261

1 Einleitung und Ziele

Methodisches Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren ist seit Jahrzehnten fester Bestandteil der Konstruktionswissenschaft im deutschsprachigen Raum (für eine Übersicht vgl. PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 12ff.; BANSE 2000, S. 78f.). Das hat seinen Niederschlag in verschiedenen VDI-Richtlinien aber auch und vor allem in der Konstruktionsausbildung an den Hochschulen gefunden. Ein systematisches Vorgehen, das sich – dem Prozess der Produktentstehung von der abstrakten Problemformulierung bis zur konkreten Produktdokumentation folgend – über verschiedene Phasen erstreckt, ist die Kernidee dieses Ansatzes. Ergänzt wird dieses Vorgehensmodell durch detaillierte Vorgaben für den Einsatz einer Vielzahl von Konstruktionsmethoden und Gestaltungsprinzipien, -regeln und -richtlinien.

Einen Aufschwung erfuhr dieser Ansatz in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts vor allem vor dem Hintergrund eines ansteigenden Bedarfs an Konstrukteuren¹ und der Ausweitung der Ausbildungskapazitäten auf der einen Seite und einem gegenüber anderen Bereichen des industriellen Produktionsprozesses diagnostizierten massiven Rationalisierungsrückstandes der Produktentwicklung insgesamt (vgl. z.B. die Tagung „Engpaß Konstruktion“, ADKI 1967) auf der anderen. Grundlage der Konstruktionsmethodik deutscher Ausprägung waren zwei wesentliche Grundideen:

- Aufbauend auf Erfahrungen mit komplexem Projektmanagement – z.B. in der US-amerikanischen Raumfahrtindustrie – wurde der systemtechnische Ansatz auf die Produktentwicklung übertragen. Dieser modelliert das zu entwickelnde Produkt als ein System zur Transformation einer Eingangsgröße (dem Problem) in eine Ausgangsgröße (die Lösung) und macht es so einer abstrakten, zunächst lösungsneutralen Beschreibung zugänglich. Wesentlicher Bestandteil dieses Konzeptes waren auch *Strategien* und *Methoden* für das Management komplexer Projekte.
- Aufbauend auf Fortschritten der Computertechnologie, der Kybernetik und der kognitionspsychologischen Forschung wurde der Prozess der Produktentwicklung als ein Information verarbeitender Prozess der komplexen Problemlösung verstanden, der – kybernetisch inspiriert – als Prozess der Informationsverarbeitung interpretiert und modelliert wurde. „Entwurfshandeln“ (zu diesem Begriff vgl. BANSE 2000, S. 19) wird in diesem Ansatz als kognitiver Transformationsprozess betrachtet, bei dem ein Ausgangszustand, der durch charakteristische Informationen gekennzeichnet ist, in einen Endzustand, der einen „höheren“ Informationszustand darstellt, transformiert wird. Dabei muss aufgrund der charakteristischen Problemstruktur von Entwurfsproblemen (vgl. SIMON 1973, RITTEL & WEBBER 1973, DÖRNER

¹ Die Begriffe „Konstrukteure“, „Entwickler“ oder „Produktentwickler“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet, da diese in der Literatur – z.T. abhängig von der betrachteten Branche – ebenso verwendet werden und eine genaue Unterscheidung oder die Bevorzugung eines dieser Begriffe nicht möglich ist. Zum nicht diskriminierenden Gebrauch männlicher und weiblicher Sprachform siehe außerdem Kapitel 1.3

1976) eine „Barriere“ überwunden werden, die eine direkte – algorithmische – Transformation durch Einsatz standardisierter Transformationsregeln behindert.

Die offenkundige Analogie zwischen beiden Konzepten bot die Möglichkeit zu einer Integration von Produkt- und Prozesssicht. Diese Kombination beider Herangehensweisen führte auf eine normativ gerichtete Konstruktionsmethodik, die zwei Ziele verfolgte:

- Der Systemansatz sollte es ermöglichen, das Produkt und seine Entstehung so zu modellieren, dass der Prozess der Produktentwicklung der Rechnerunterstützung zugänglich wurde. Erklärtes Ziel war, den Produktentwicklungsprozess durchgängig zu modellieren und – mindestens in Teilen – zu automatisieren.
- Der Ansatz des komplexen Problemlösens sollte die Konstruktionsausbildung und das Entwurfshandeln in der industriellen Produktentwicklungspraxis standardisieren und rationalisieren. Das bis dahin als – weitgehend auf Erfahrung basierende – intuitive Kunst interpretierte Entwurfshandeln sollte lehrbar, d.h. als systematische, Information verarbeitende Tätigkeit einer ebenso systematischen Ausbildung mit reproduzierbaren Ergebnissen zugänglich werden. Zudem sollte in möglichst kurzer Zeit eine verlässliche Kompetenz aufgebaut werden, die ansonsten nur in langjähriger Berufserfahrung zu erwerben war.

Während sich dieser Ansatz in der Konstruktionsausbildung auf breiter Front durchsetzen konnte und auch alle maßgeblichen Lehr- und Handbücher konstruktionsmethodische Grundkompetenzen enthalten, muss doch konstatiert werden, dass in der industriellen Produktentwicklungspraxis der Durchbruch in den meisten Fällen ausgeblieben ist. Dieses ist umso erstaunlicher, als inzwischen mehrere Generationen konstruktionsmethodisch ausgebildeter Ingenieure in der Berufspraxis stehen, die jedoch offenkundig ihr erworbenes Wissen nicht in dem angestrebten Umfang oder nicht in der angestrebten Art und Weise anwenden. Diese Diskrepanz hat in den letzten Jahren zu einer Vielzahl von Forschungsvorhaben geführt, die zum einen den tatsächlichen Einsatz konstruktionsmethodischer Vorgehensvorschläge in der industriellen Praxis, zum anderen die Anwendbarkeit dieser Vorgehensvorschläge in experimentellen Studien im Labor untersuchten (vgl. Kapitel 3). Hierbei wurden wiederholt Widersprüche zwischen tatsächlichem Vorgehen und konstruktionsmethodischen Vorgaben identifiziert. Nicht untersucht wurde in dieser stark deskriptiv orientierten Forschung jedoch meistens, wie sich die verschiedenen Vorgehensweisen auf den Konstruktions*erfolg* auswirken. Der erklärte Ansatz der Pioniere der Konstruktionsmethodik war schließlich nicht, die als ungenügend diagnostizierten tatsächlichen Vorgehensweisen zu konservieren und zu unterstützen, sondern diesem traditionellen Vorgehen ein radikal neues, „ideales“ Vorgehen entgegenzusetzen, das nach ihrer festen Überzeugung zu besseren, schnelleren und reproduzierbareren Ergebnissen führen musste (vgl. Kapitel .2.1).

Im Zentrum dieser Arbeit steht deshalb die Frage, ob konstruktionsmethodische Vorgehensvorschläge geeignet sind, den Konstruktionsprozess und seine Ergebnisse tatsächlich zu verbessern. Hierzu wurde zunächst die empirische konstruktionswissenschaftliche Forschung der letzten Jahrzehnte aufgearbeitet und aufbauend auf den Er-

gebnissen eine eigene Laborstudie konzipiert und durchgeführt, die klären sollte, welche Vorgehensweisen tatsächlich zu mehr Konstruktionserfolg führen. Weiteres Forschungsziel war außerdem die Klärung der Frage, welche Form der Ausbildung am ehesten geeignet ist, solche erfolgreichen Vorgehensweisen bei den Studierenden zu verankern.

Im Ergebnis konnten tatsächlich erfolgreiche und weniger erfolgreiche Vorgehensweisen eindeutig differenziert werden. Dieses führt auf grundlegend andere Modellvorstellungen vom individuellen Vorgehen im Prozess der Produktentwicklung, zu einer Re-Interpretation der Konzeptphase als einen erfahrungsbasierten, iterativen Lernprozess.

Diese Modellvorstellungen stellen dabei keineswegs die Grundüberlegungen der Konstruktionsmethodik in Frage. Sie enthalten weiterhin wesentliche Kernelemente dieser Tradition, versuchen jedoch, diese vor dem Hintergrund veränderter Rahmenbedingungen und aufbauend auf den Erkenntnissen der empirischen Konstruktionsforschung neu zu positionieren.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens „Anwendung methodikbasierten Vorgehens in frühen Phasen des Konstruktionsprozesses (Konzeptphase)“, das in Kooperation zwischen der TU Berlin (Fachgebiet Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik) und der TU Dresden (Fachgebiet Allgemeine Psychologie) durchgeführt und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter den Kennzeichen Be479/68-1 und Ha2249/11-1 gefördert wurde. Dieses Forschungsvorhaben lieferte nicht nur neue Erkenntnisse für den Bereich der Konstruktionswissenschaft, sondern führte auch zu grundlegend neuen Erkenntnissen für die kognitive Psychologie des Problemlösens. Diese werden in einem weiteren Dissertationsvorhaben an der TU Dresden dargestellt (PIETZCKER 2004).

1.1 Zielsetzung und Forschungsansatz

Diese Arbeit ist das Ergebnis einer interdisziplinären Kooperation zwischen Ingenieurwissenschaft auf der einen und kognitiver Psychologie auf der anderen Seite. Eine solche Zusammenarbeit ist nahe liegend, weil der Forschungsgegenstand aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften stammt, die für die konkreten Forschungsfragen am besten geeignete Theorie und die Forschungsmethodologie jedoch im Bereich der empirischen kognitionspsychologischen Forschung viel weiter entwickelt sind.

Wie immer bei interdisziplinärer Kooperation mussten dabei beide Seiten aufeinander zugehen und für das konkrete Projekt spezifische Anpassungen an Begriffssystemen, Modellen und Methoden vornehmen. Grund für diese Notwendigkeit ist vor allem eine „Asymmetrie des Wissens“ (BECKENBACH 1993, S. 41ff.) zwischen Ingenieur- und Sozialwissenschaften. Diese Asymmetrie des Wissens zieht weitere Asymmetrien in den Zielsetzungen der Forschung, dem Erkenntnisinteresse und den Methodologien nach sich (Abbildung 1-1).

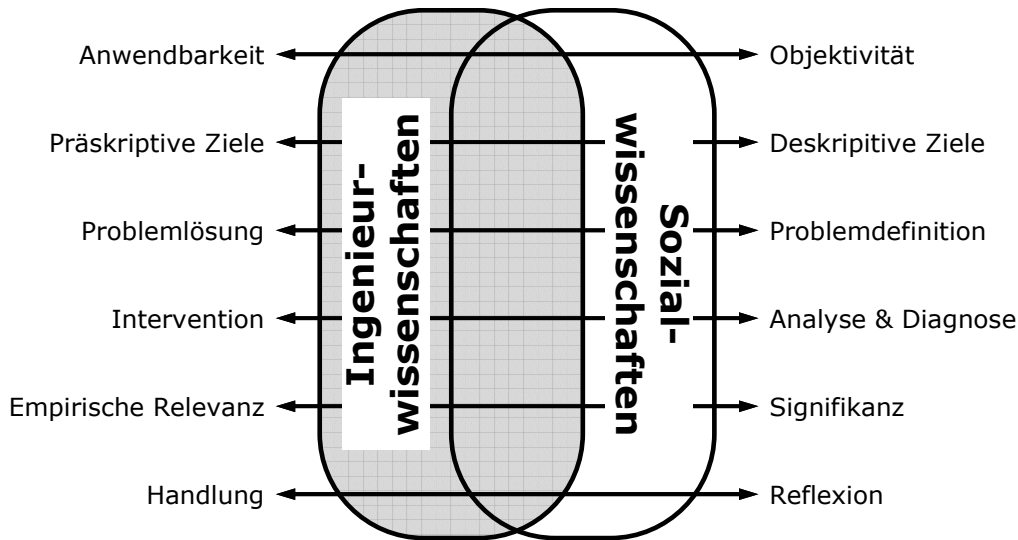


Abbildung 1-1: Asymmetrie zwischen Ingenieur- und Sozialwissenschaften (vgl. auch BENDER ET AL. 2002A)

Ingenieurwissen ist in erster Linie „Problemlösungswissen“ (BECKENBACH 1993, S. 42), das „die Definition von Lösungsräumen und die Systematisierung von relevanten Variablen, Zielparametern und Optimierungskriterien“ (BECKENBACH 1993, S. 43) beinhaltet. Es zielt damit auf die Anwendbarkeit in einer konkreten (industriellen) Praxis, auf aktive Intervention und verfolgt deshalb vor allem präskriptive Zielsetzungen.

Wissen in den (empirischen) Sozialwissenschaften ist vor allem „Reflexionswissen mit empirischer Referenz“ (BECKENBACH 1993, S. 45). Es zielt auf die „solide Analyse und Diagnose von konkreten Handlungszusammenhängen und Entwicklungspotentialen“. (BECKENBACH 1993, S. 44). Gütekriterien wie Objektivität und Signifikanz stehen im Vordergrund, die Forschungsziele sind überwiegend deskriptiver Natur.

Wie eine Vielzahl von Forschungsvorhaben der letzten Jahrzehnte gezeigt hat, ergänzen sich diese Gegensätze im Bereich der empirischen Konstruktionsforschung auf hervorragende Weise. Der ingenieurwissenschaftlichen Konstruktionsforschung mangelt es an einer allgemein akzeptierten Theorie des Entwurfshandelns und ihre Fokussierung auf die schnelle Anwendbarkeit von Modellen und Methoden in der industriellen Praxis ging oft zu Lasten der methodisch-empirischen Validität. Theoriebausteine und methodologische Standards aus den Sozialwissenschaften konnten und können hier bei entsprechender Anpassung an den Untersuchungsgegenstand große Lücken schließen und das für erfolgreiche Problemlösungskonzepte nötige theoretische und methodologische Fundament stabilisieren.

Dieser Ansatz erwies sich auch für die vorliegende Arbeit als fruchtbar. Ohne die – nicht immer konfliktfreie – interdisziplinäre Kooperation wären die meisten Ergebnisse nicht zu erzielen gewesen.

1.1.1 Leitbild

Leitbilder beeinflussen Ziele und Ansätze der Forschung maßgeblich, das gilt natürlich auch für die Konstruktionsforschung (BENDER, (BEATE) ET AL. 2001). Auf der Ebene einer

Disziplin prägen diese Leitbilder als Paradigmen Ziele, Begriffssysteme, Modelle und Methoden der „scientific community“ und bestimmen so, welche theoretischen Fundamente allgemein akzeptiert sind, welche Fragen gestellt, welche Methoden eingesetzt, und somit auch, welche Ergebnisse überhaupt erzielt werden können. (vgl. KUHN 1962)

Bei der Diskussion unterschiedlicher Forschungsergebnisse und inhaltlicher Standpunkte ist es deshalb hilfreich, zunächst zu klären, ob diese Unterschiede auf der Basis gleicher oder verschiedener Paradigmen zu Stande gekommen sind. Im ersten Fall stellen sie eine immanente Herausforderung an das Paradigma dar, die innerhalb der Disziplin zu einem Klärungsprozess, ggf. einem Paradigmenwechsel, führen kann – und muss. Im letzteren Fall ist eine immanente Klärung nicht möglich und die Auflösung des Widerspruches auch nicht in jedem Falle nötig. Unterschiedliche Forschungsergebnisse auf Basis unterschiedlicher Paradigmen stellen im Sinne guter wissenschaftlicher Praxis keinen problematischen Widerspruch dar. Hier kann auch sinnvoll kaum über die Ergebnisse selbst, sondern nur über die dahinter liegenden Leitbilder diskutiert werden.

Im Falle der Konstruktionsforschung im Maschinenbau kann man mindestens zwei konkurrierende Klassen von Leitbildern ausmachen (vgl. BENDER, (BEATE) ET AL. 2001, S. 317):

a) ein an Technologie orientiertes Leitbild,

das davon ausgeht, dass Produktentwicklungsprozesse mit Hilfe exakter Algorithmen der Informationsverarbeitung durch Computer modelliert, simuliert und automatisiert werden können. Dieses umfasst den gesamten Prozess der Anforderungsmodellierung, Funktionsmodellierung, Geometriemodellierung und der konkreten Produktdefinition (vgl. z.B. GRABOWSKI ET AL. 1998B). Bei diesem Ansatz wird die prinzipielle Möglichkeit der vollständigen und durchgängigen Modellierbarkeit des Produktentwicklungsprozesses unterstellt, wobei lediglich die bisher noch mangelhafte zur Verfügung stehende Leistung der Computertechnologie der Umsetzung im Wege steht. (vgl. z.B. KRAUSE ET AL. 1998)

b) ein an Menschen orientiertes Leitbild,

das davon ausgeht, dass der Schlüsselfaktor für erfolgreiche Produktentwicklung die Menschen im Produktentwicklungsprozess sind (vgl. z.B. FRANKENBERGER ET AL. 1998). Hier werden individuelle und kollektive Denk- und Handlungsweisen der Produktentwickler als Maßstab für den erfolgreichen Produktentwicklungsprozess angesehen. Diese Handlungsweisen sollen durch verschiedene Maßnahmen so unterstützt werden, dass sie sich in optimaler Weise entfalten können. Hierzu gehören die Ausbildung und das Training von Produktentwicklern, eine optimale Prozess- und Arbeitsorganisation sowie *Rechnerunterstützung* für den Teil der Tätigkeiten, die für eine solche Unterstützung geeignet sind.

Eine Gegenüberstellung dieser beiden Forschungsleitbilder liefern BENDER, (BEATE) ET AL. 2001 (Tabelle 1-1).

Tabelle 1-1: Gegenüberstellung technologie- und menschenzentrierter Forschungsleitbilder in der Konstruktionsforschung (BENDER, (BEATE) ET AL. 2001S. 316)

	technology oriented	human oriented
goals	<ul style="list-style-type: none"> – subdivision of the overall process into partial processes – automation of as many partial processes as possible – high availability of information through universal data concepts (process chain) 	<ul style="list-style-type: none"> – optimisation of cooperation and coordination performance – motivation and integration of the collaborators – high availability of information through organisational integration (shallow organisation)
management model and principles	<ul style="list-style-type: none"> – management process partially automated by supporting software – workflow determined by software 	<ul style="list-style-type: none"> – target planning – delegation of management functions to lower levels of hierarchy – self management in teams
organisation structure and workflow	<ul style="list-style-type: none"> – determination according to supporting software – cross functional – parallel-hierarchical approach 	<ul style="list-style-type: none"> – determination by all collaborators via targets – cross functional – integrated approach
managerial authority	<ul style="list-style-type: none"> – overlapping authorities in matrix structures – clear authorities required for data management in process chains 	<ul style="list-style-type: none"> – overlapping authorities in matrix structures
feedback, iteration loops	<ul style="list-style-type: none"> – depend on the use of supporting software 	<ul style="list-style-type: none"> – short loops because of regular information exchange in teams
information flow	<ul style="list-style-type: none"> – independent from the individual – individual is responsible for collecting relevant information 	<ul style="list-style-type: none"> – related to the individual – individual is responsible for providing and requesting information

Natürlich vermischen sich in der Praxis oft beide Strategien. Gleichwohl gibt die Tabelle die Schwerpunkte wieder, auf die Vertreter des einen oder des anderen Leitbildes jeweils ihr Hauptaugenmerk richten.

Dieser Arbeit liegt ein menschenzentriertes Forschungsleitbild zugrunde, im Wesentlichen aus drei Gründen:

- Der Produktentwicklungsprozess entzieht sich in seinen schöpferischen Teilen aus *prinzipiellen* Gründen der Automatisierung.

Voraussetzung für die Automatisierung von Produktentwicklungsprozessen wären zum einen die Modellierung des Prozesses in eindeutigen Algorithmen und zum anderen die parallele Simulation des Produktentstehungsfortschritts. Dieser Syntheseprozess kann jedoch schon deshalb nicht vollständig und eindeutig modelliert werden, weil die Eingangsinformation des Prozesses – d.h. die Gesamtheit der Produkthanforderungen und Randbedingungen – auch theoretisch eben noch nicht das ideale Produktmodell enthält und deshalb ein algorithmisierbarer, bidirektionaler Pfad zwischen Anforderungen und Lösung nicht existiert. Dieses ist – folgt man dem von DÖRNER 1976 eingeführten Konzept der lösungsbehindernden „Barriere“ (vgl. Kapitel 2.3.1) – gerade das wesentliche Merkmal, das ein Problem von einer Aufgabe unterscheidet. Die Struktur des Problems ist in sich selbst iterativ in dem Sinne, dass erst bei fortschreitender Lösungskonkretisie-

rung das Problem selbst konkretisiert werden kann. „It is easily seen that design in the sense of forming judgements can never be simulated by a computer, because in order to program that machine you would have to anticipate all potential solutions and make all possible deontic judgements ahead of time before the machine could run.“ (RITTEL 1972, S. 321, vgl. auch MARPLES 1961, RITTEL & WEBBER 1973, GRIES 2002).

- Eine Verdrängung des Menschen aus dem Produktentwicklungsprozess ist nicht wünschenswert.

Obwohl Menschen bei ihrem Handeln unvermeidlich auch Fehler machen, kann und darf man die handelnden Menschen nicht auf eine potenzielle Fehlerquelle reduzieren und den Umkehrschluss ziehen, dass man ihre Aufgaben zur Fehlervermeidung möglichst umfassend automatisieren sollte. Die besondere Fähigkeit von Menschen (vgl. z.B. HUBIG ET AL. 2000, S. 19ff.; BANSE 2000), in der Zukunft erst zu schaffende Artefakte mental voraus zu denken, zu planen, in ihren künftigen Eigenschaften zu modellieren und zu beurteilen, ist für eine erfolgreiche Produktentwicklung unverzichtbar. Die Möglichkeit, diese besonderen Fähigkeiten im Beruf auch einzusetzen, bietet vielen Menschen eine faszinierende und erfüllende Aufgabe und Herausforderung.

- Der technologiezentrierte Ansatz vernachlässigt entscheidende Erfolgsfaktoren der Produktentwicklung.

Basierend auf erfolgreichen Konzepten der Produktionsrationalisierung konzentriert sich bei diesem Ansatz die Problemsicht auf das klassische Dreieck aus Kosten, Qualität und Zeit. Dabei wird jedoch vernachlässigt, dass für die erfolgreiche Produktentwicklung noch mindestens zwei weitere Zielbereiche von entscheidender Bedeutung sind, nämlich die Erfüllung von Kundenanforderungen und die Fähigkeit zur Produktinnovation (vgl. z.B. TEGEL 1996, S. 61ff.). Rationalisierung und Automatisierung in der Produktentwicklung wären zwar in der Lage, Produkte schneller und kostengünstiger dem Markt zur Verfügung zu stellen und auch die Qualität eines Produktes kann innerhalb der vorgegebenen Produktspezifikation auf diese Weise optimiert werden. Wirklich neue Produktmerkmale, innovative neue Wege zur Erfüllung herkömmlicher Funktionen oder gänzlich neue Produkte für ggf. auch gänzlich neue Märkte sind auf diese Weise jedoch nicht zu erzielen. Für die kreative Verfolgung neuer, nicht üblicher Denkansätze braucht es auch weiterhin – und in zunehmendem Maße – kundenorientiert und innovativ denkende Menschen im Produktentwicklungsprozess.

Diese Arbeit konzentriert sich deshalb auf die Untersuchung und Unterstützung des individuellen Denkens und Handelns von Konstrukteuren. Dabei liegen die folgenden – durchaus subjektiven – Grundannahmen des Autors dem Forschungsleitbild zugrunde:

- „Die Vorgehensstrategie in der Produktentwicklung muss sich an den Fähigkeiten und Bedürfnissen der beteiligten Individuen orientieren.

Nur durch deren aktive Unterstützung kann der Produktentwicklungsprozess erfolgreich sein. Werden die Bedürfnisse und Möglichkeiten der Menschen übergangen, so ist mit offenen oder verdeckten Widerständen zu rechnen, die weder durch Anweisungen noch

durch Sanktionen verhindert oder ausgeglichen werden können.“ (BENDER, (BEATE) 2001, S. 9)

- Man kann das für eine erfolgreiche Produktentwicklung nötige Wissen, die benötigten Fähigkeiten und Fertigkeiten lehren und lernen.

Für eine systematische und reproduzierbare Vermittlung der Grundlagen des Konstruierens bedarf es zum einen einer expliziten Vermittlung von Wissen und Regeln im Rahmen konstruktionsmethodischer Ausbildung und zum anderen der erfahrungsgelernten, individuellen Selbsteignung durch die (potenziellen) Konstrukteure durch reflektierte praktische Anwendung im Verlauf von Studienprojekten und Berufspraxis.

- Die Konstruktionsmethodik ist die geeignete Grundlage für einen menschenzentrierten Forschungsansatz, weil sie u.a. auch auf sozialwissenschaftlichen Erkenntnissen aufbaut.

Die unter normativen Zielsetzungen im deutschsprachigen Raum entstandene Konstruktionsmethodik integriert mindestens in Teilen Modellvorstellungen der kognitiven Psychologie (z.B. das Modell des Problemlösens als Informationsverarbeitung, vgl. Kapitel 2.3.1) und liefert somit ein Theoriegerüst für eine menschenzentrierte Unterstützung von Produktentwicklungsprozessen. Sie stellt Begriffssysteme, Modelle und Methoden für die Beschreibung, Modellierung und Steuerung des Produktentwicklungsprozesses und des Prozesses des tatsächlichen Produktfortschrittes (d.h. des Produktentstehungsprozesses) zur Verfügung und verbindet damit die Produkt- und die Prozesssicht. Sie muss jedoch modernisiert, d.h. von z.T. überholten Annahmen und Erkenntnissen aus ihrer Entstehungszeit befreit und an heutige Rahmenbedingungen angepasst werden.

Diese Elemente eines Forschungsleitbildes münden in die Überzeugung, dass ein solcher menschenzentrierter Ansatz zu motivierteren und zufriedeneren Produktentwicklern und im Ergebnis zu besseren Produkten und effektiveren Prozessen führen kann.

1.1.2 Forschungsfragen

Untersucht werden in dieser Arbeit individuelle Vorgehensweisen beim Lösen konkreter Konstruktionsprobleme und der dabei erzielte individuelle Konstruktionserfolg in der Konzept- und frühen Entwurfsphase. Diese Phasen werden von der Konstruktionsmethodik besonders betont (vgl. Kapitel 2.1). Im Mittelpunkt stehen dabei drei empirische Forschungsfragen (Abbildung 1-2):

- Welchen Einfluss hat eine *konstruktionsmethodische Ausbildung* auf den erzielbaren *Konstruktionserfolg* in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?

Es wird untersucht, ob eine konstruktionsmethodische Ausbildung einen signifikanten Einfluss auf den Konstruktionserfolg, gemessen an der Güte der erarbeiteten Lösungen, hat.

- Welchen Einfluss hat eine *konstruktionsmethodische Ausbildung* auf das *tatsächliche Vorgehen* beim Konstruieren in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?

Es wird untersucht, inwieweit sich eine konstruktionsmethodische Ausbildung im anschließend bei den so Ausgebildeten tatsächlich beobachteten Vorgehen beim Lösen von Konstruktionsaufgaben aus der Konzept- und frühen Entwurfsphase niederschlägt.

- Welchen Einfluss hat das *tatsächliche Vorgehen* beim Konstruieren auf den erzielbaren *Konstruktionserfolg* in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?

Es wird untersucht, ob unabhängig von der Form der absolvierten Konstruktionsausbildung bestimmte individuelle Vorgehensstile einen signifikanten Einfluss auf den Konstruktionserfolg haben.

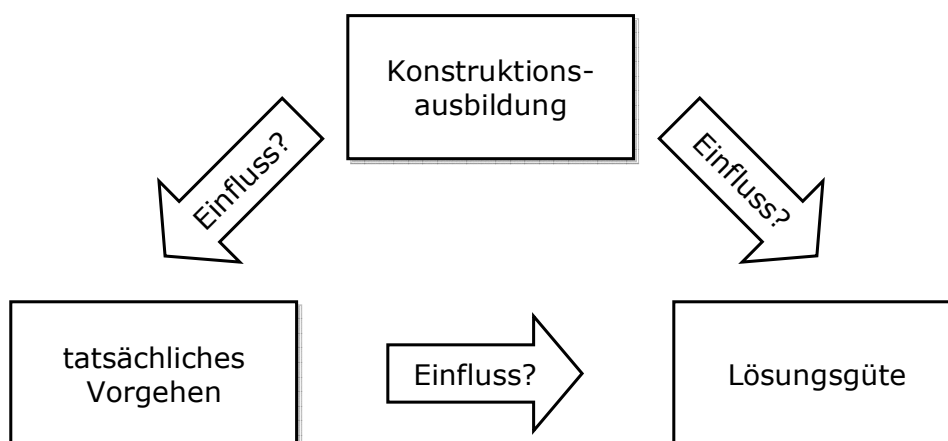


Abbildung 1-2: Forschungsfragen dieser Arbeit

Aufbauend auf diesen empirischen Fragestellungen verfolgt diese Arbeit das präskriptive Ziel, Interventionsvorschläge für die Konstruktionsausbildung und die industrielle Produktentwicklungspraxis abzuleiten. Im Mittelpunkt dieses Syntheseschrittes, der theoretische Grundüberlegungen und die Ergebnisse der empirischen Forschung zusammenführt, stehen die folgenden präskriptiven Forschungsfragen:

- Wie können Konstruktionsmethodik und Konstruktionstheorie weiterentwickelt werden?
- Wie können als erfolgreich identifizierte Vorgehensweisen effektiv gelehrt und gelernt werden?

Die Forschungsmethodologie ist in der Konstruktionswissenschaft noch nicht sehr stark entwickelt (vgl. z.B. BLESSING ET AL. 1998). Das liegt zum einen an der außerordentlichen Komplexität des Betrachtungsgegenstandes, die in der Regel nur interdisziplinäre Herangehensweisen erlaubt. Zum anderen ist ein einheitlicher Methodenkanon auch traditionell nicht Kernbestandteil der Ingenieurwissenschaften, die sich viel stärker als andere – ältere – Disziplinen auf die Artefakte und Gegenstände ihres Faches als auf Methodenfragen konzentrieren. Deshalb wird der Forschungsmethodologie für die Beobachtung, Analyse und Interpretation komplexer Konstruktionstätigkeiten im Rahmen individueller Produktentwicklungsprozesse in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit umfasst zwei Hauptlinien, eine erste mit theoretisch-analytischem Schwerpunkt und eine zweite, die eine eigene empirische Studie und ihre Ergebnisse umfasst. Schließlich werden diese beiden Linien in einer Synthese zusammengeführt.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel:

In Kapitel 2 Methodische Produktentwicklung wird die Entwicklung der Konstruktionsmethodik im deutschsprachigen Raum beleuchtet. Es wird dargestellt, auf welchen Grundannahmen und Modellvorstellungen diese Forschungstradition aufbaut und welchen Stand sie heute erreicht hat. Kritik an diesem Ansatz und Akzeptanzprobleme in der industriellen Produktentwicklungspraxis werden näher betrachtet. Außerdem werden – als wesentliche Grundlage moderner Konstruktionsmethodik – kognitionspsychologische Grundlagen des komplexen Problemlösens sowie Charakteristika des Erwerbs von Expertenkompetenz dargestellt.

In Kapitel 3 Empirische Untersuchungen des Entwurfshandelns werden diesem normativen Konzept Ergebnisse empirischer Konstruktionsforschung gegenübergestellt, die Erkenntnisse darüber liefern, wie Entwickler und Konstrukteure in der Praxis und in Laborversuchen tatsächlich vorgehen. Dabei werden empirische Studien nicht nur aus dem Bereich der Produktentwicklung im Maschinenbau sondern auch aus der Softwareentwicklung und der Architektur herangezogen. Als Ergebnis dieser Analyse werden Forschungshypothesen für diese Arbeit abgeleitet.

Kapitel 4 Laborstudie: Ausbildung, Vorgehen, Konstruktionserfolg beschreibt den Aufbau der empirischen Laborstudie, die im Zentrum dieser Arbeit steht. Das Labor- und Versuchsdesign, die Auswahl von Versuchspersonen und die Erarbeitung von Konstruktionsaufgaben werden dargestellt, ebenso die Forschungsmethodologie für die Beobachtung, Analyse und Interpretation des individuellen Vorgehens. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung von Gütekriterien für die empirische Forschung und der Operationalisierung dieser Kriterien für das eingesetzte empirische Forschungsdesign.

In Kapitel 5 Ergebnisse der Laborstudie werden die Ergebnisse der Laborstudie dargestellt. Hier liegt der Schwerpunkt auf der statistischen Analyse der erhobenen Daten und der Prüfung der in Kapitel 3.4 aufgestellten Forschungshypothesen.

In Kapitel 6 Synthese: Konzipieren und Entwerfen als Lernprozess werden die Ergebnisse der Laborstudie vor dem Hintergrund der in den Kapiteln 2 und 3 dargelegten theoretischen Überlegungen interpretiert und im Sinne von Interventionsansätzen für die Konstruktionsausbildung und -praxis einer Synthese zugeführt. Schwerpunkt ist hier vor allem die Vorstellung eines neuen Vorgehensmodells für die Konzeptphase und die Darlegung von Schlussfolgerungen für die Weiterentwicklung der Konstruktionsausbildung.

Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblick schließlich fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

1.3 Anmerkungen zu Sprache und Form der Arbeit

Diese Arbeit wurde nach den Regeln der reformierten deutschen Rechtschreibung verfasst, wobei jedoch aus Gründen der besseren Lesbarkeit in einigen Sinn entstellenden Ausnahmefällen auf „alte“ Rechtschreibregeln zurückgegriffen wurde. So wird zwar „Prozess“ anstelle von „Prozeß“ und „dass“ anstelle von „daß“ verwendet, jedoch bei zusammengesetzten Verben z.B. „zusammenfassen“ anstelle von „zusammen fassen“, da zwischen beiden Formulierungen ein offenkundiger Sinnunterschied besteht. Gleiches gilt für zusammengesetzte Adjektive und Adverbien: z.B. „zielführend“ anstelle von „Ziel führend“, aber „Erfolg versprechend“ anstelle von „erfolgversprechend“.

Ebenfalls aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der männlichen und weiblichen Sprachform (z.B. „Ingenieurinnen und Ingenieure“) verzichtet und – wo möglich – eine geschlechtsneutrale („Studierende“) oder die männliche Sprachform verwendet, es sei denn, dieses wäre Sinn entstellend. Die Verwendung männlicher Sprachformen schließt weibliche Angehörige der angesprochenen Gruppe ausdrücklich ein.

Zitate in englischer Sprache werden überwiegend im Original wiedergegeben, um Übersetzungsungenauigkeiten zu vermeiden. Dabei wird die vom jeweiligen Autor benutzte britische oder US-amerikanische Form der Rechtschreibung übernommen. Wo solche Zitate oder einzelne Begriffe auch in deutscher Übersetzung verwendet werden, stammen diese Übersetzungen vom Autor dieser Arbeit, der für eine ggf. ungenaue Übersetzung allein verantwortlich ist.

2 Methodische Produktentwicklung

„Konstruieren als Form des Ingenieurhandelns bedeutet in erster Linie, neue oder verbesserte technische Sachsysteme zu antizipieren, d.h. gedanklich vorwegzunehmen. Das schließt ein, sie zu konzipieren, zu entwerfen und auszuarbeiten (zu bemessen und zu dimensionieren).“ (BANSE & FRIEDRICH 2000, S. 13) Diese „schöpferischen und schematischen, technisch Neues oder verbessertes generierenden Problemlösungsprozesse [...], die sich einerseits auf Intuition, Inspiration und Phantasie, auf individuelle Erfahrungen und Fähigkeiten sowie auf – oftmals unreflektierte bzw. tradierte – Routineprozesse auf der Basis von Anschauungs- und Vorstellungsvermögen [...], andererseits auf (mehr oder weniger) systematisch gewonnene sowie (unterschiedlich streng) begründete und reflektierte Kenntnisse vor allem über das Naturgesetzlich-Mögliche [...] gründen“ (BANSE & FRIEDRICH 2000, S. 13), gehören zu den kognitiv anspruchsvollsten Tätigkeiten, die Menschen ausüben in der Lage sind. Lange Zeit wurde das Konstruieren deshalb als eine *Kunst* angesehen, die sich der Unterwerfung unter Regeln und Gesetzmäßigkeiten weitgehend entzieht und deren Kompetenzen somit – im Gegensatz z.B. zur Physik oder Mathematik – auch nicht systematisch lehrbar bzw. erlernbar seien. Unter dem Einfluss der Industrialisierung wurde dies zunehmend als Defizit begriffen, da es schnell an einer ausreichenden Zahl gut ausgebildeter Konstrukteure mangelte. Es wurden deshalb Versuche unternommen, auch das Konstruieren systematisch wissenschaftlich zu durchdringen. Vor allem im deutschsprachigen Raum führte dies zur Tradition einer präskriptiv-normativen Konstruktionsmethodik². Diese „Schule“ war und ist prägend für die europäische Konstruktionsforschung und hat ihr vor allem in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg die wichtigsten Anstöße gegeben, wie z.B. die Entwicklung der ICED-Konferenzen eindrucksvoll zeigt. Sie hat über die Übersetzung des Standardwerkes von Pahl und Beitz (PAHL & BEITZ 1977 bis PAHL & BEITZ ET AL. 2003) ins englische und sieben weitere Sprachen sowie durch die Vorlage einer englischen Fassung der VDI-Richtlinie 2221 eine weltweite Verbreitung gefunden. Dieser Ansatz stellt damit einen einzigartigen Erfolg und die eigentliche Begründung – mindestens des präskriptiven Zweiges – der modernen Konstruktionsforschung dar. Die historische Entwicklung der präskriptiven Konstruktionsmethodik wird deshalb hier anhand der Arbeiten ihrer maßgeblichen Wegbereiter nachgezeichnet (Kapitel 2.1). Dabei folgt die Darstellung überwiegend einem chronologischen Ablauf, versucht jedoch, zusammenhängende Forschungslinien auch zusammenhängend wiederzugeben, so dass sich z.T. zeitliche Überlappungen ergeben.

Trotz dieser Verbreitung im wissenschaftlichen Umfeld und obwohl spätestens seit den 1970'er Jahren mehrere Generationen von Konstrukteuren konstruktionsmethodisch ausgebildet wurden, ist in der industriellen Produktentwicklungspraxis der Durchbruch in den meisten Fällen ausgeblieben. Es sollen deshalb Kritikpunkte und Aspekte der An-

² Es hat auch international vergleichbare präskriptive Ansätze gegeben (vgl. z.B. ASIMOV 1962, ARCHER 1971, FRENCH 1971, FRENCH 1985, einen Überblick gibt BLESSING 1995), die Betrachtung in diesem Kapitel konzentriert sich jedoch auf die deutschsprachige Konstruktionsmethodik.

wendbarkeit und Akzeptanz konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen kurz beleuchtet werden (Kapitel 2.2).

Da die Lehrbarkeit und Erlernbarkeit effektiver Vorgehensstrategien beim Entwickeln und Konstruieren ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist, werden in Kapitel 2.3 kognitionspsychologische Grundlagen des Konstruierens und des Erwerbs komplexer Handlungskompetenzen in der Konstruktionsausbildung beschrieben.

2.1 Die Konstruktionsmethodik: Ein präskriptives Vorgehensmodell

In ihren Ursprüngen geht die Tradition der systematischen Untersuchung des Konstruierens und der Formulierung einer wissenschaftlichen Theorie dieses Gegenstandes zurück bis ins 19. Jahrhundert, als Reuleaux (REULEAUX & MOLL 1854, REULEAUX 1875, REULEAUX 1900) den Versuch unternahm, eine „Maschinenwissenschaft der Deduktion“ (REULEAUX 1875, S. 26) zu entwickeln, „[...] d.h. das Aufstellen sicherer (also theoretisch begründeter bzw. fundierter) Regeln, die als Axiome zur Errichtung eines deduktiven Systems dienen sollten, und von denen ausgehend die verschiedensten Mechanismen hinsichtlich Gestaltung, Bemessung und Dimensionierung entwickelbar seien.“ (BANSE 2000, S. 46). Er war damit der prominenteste Vertreter eines theoretisch-wissenschaftlichen Ansatzes an den Technischen Hochschulen im deutschsprachigen Raum, der im Gegensatz zum dominierenden Ansatz des starken Praxisbezuges der Ingenieurwissenschaften stand. Reuleaux versuchte, ein Begriffssystem, mit dem sich alle (mechanischen) Maschinen beschreiben ließen, und ein Symbolsystem, mit dem sich Maschinen auf einem hohen Abstraktionsniveau unter Vernachlässigung ihrer geometrischen Merkmale darstellen ließen, zu etablieren. Zusammen mit „Bildungsgesetzen der Maschine“ sollte eine „kinematische Synthese“ erreicht werden, deren Aufgabe darin bestand, „[...] diejenigen Elementenpaare, Ketten und Mechanismen anzugeben, durch deren geeignete Verbindung sich ein Bewegungszwang von gegebener Art verwirklichen lässt.“ (REULEAUX 1875, S. 531) Diese Umkehrung seiner kinematischen Analyse sollte durch Einsatz vorgegebener Grundelemente und Regeln der Kombinatorik mit wissenschaftlichen Methoden auf eindeutige Lösungen für (mechanische) Konstruktionsaufgaben führen (Abbildung 2-1).

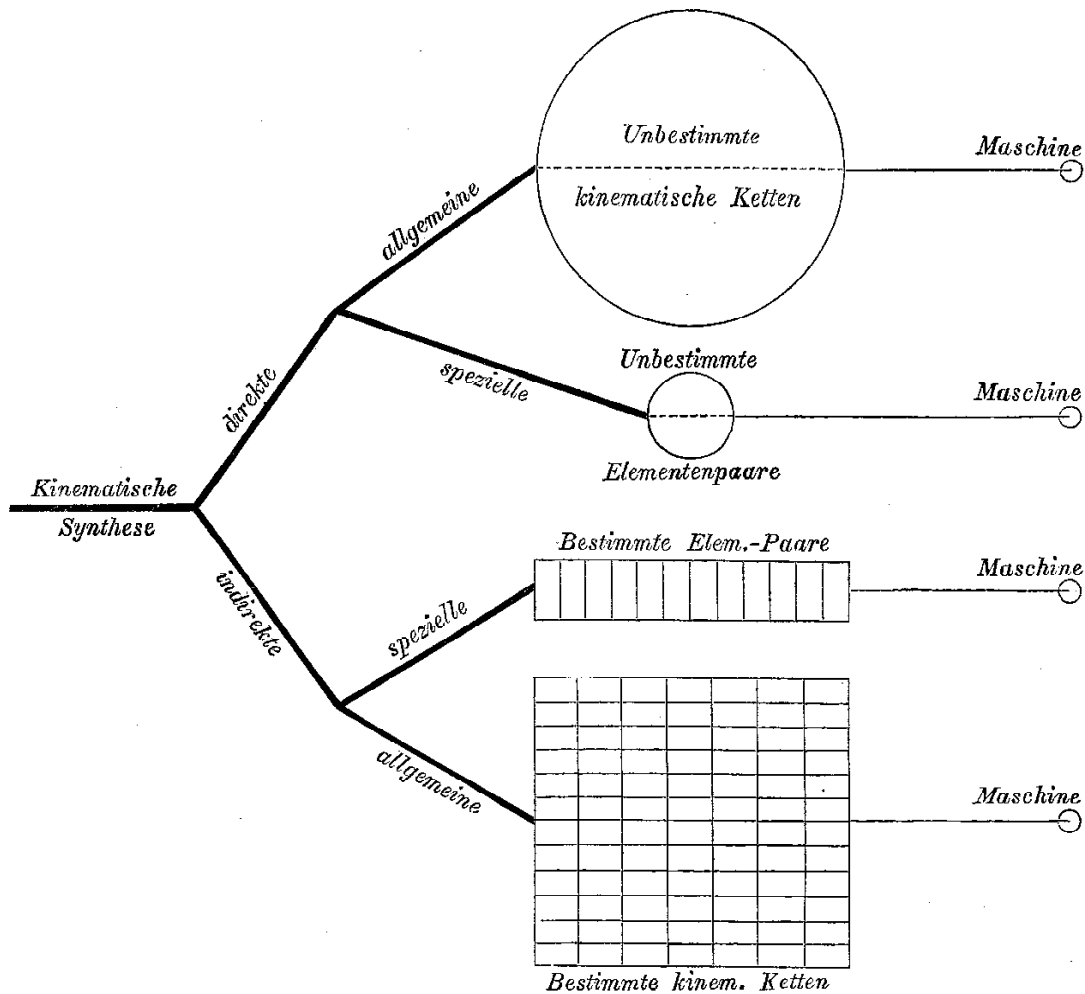


Abbildung 2-1: Verfahren der kinematischen Synthese (REULEAUX 1875, S. 536)

Dieser theoretische Ansatz sollte in Anlehnung an etablierte Universitätsdisziplinen insbesondere die Lehrbarkeit des Ingenieurwesens verbessern, konnte sich aber letztlich nicht durchsetzen. Trotzdem kann Reuleaux als Pionier betrachtet werden, dessen Ansätze des Aufbaus komplexer technischer Systeme aus elementaren Wirkprinzipien sich z.B. in den Arbeiten von ROTH ET AL. 1971, HUBKA 1973, und KOLLER 1976 wiederfinden, aber auch international in Konzepten der axiomatischen Konstruktionstheorie (z.B. YOSHIKAWA 1983, SUH 1990). Sein Hauptverdienst liegt jedoch „[...] in dem Bemühen um ein konsistentes Beschreibungssystem der gesamten Maschinentechnik als Grundlage für eine technische Heuristik.“ (HUBIG ET AL. 2000, S. 308) Dieser Ansatz kann als Grundlage aller folgenden präskriptiven Konstruktionsmethodiken im deutschsprachigen Raum angesehen werden.

Mit dem zunehmenden Rationalisierungsdruck und dem Mangel an Konstrukteuren erfuhren solche Ansätze jedoch erst während und nach dem zweiten Weltkrieg eine Renaissance. WÖGERBAUER 1943 stellt dabei mit seiner „Technik des Konstruierens“ „[...] den eigentlichen Ausgangspunkt methodischen Konstruierens [...]“ dar. (PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 13) Er verfolgt das Ziel, die schöpferisch-konstruierende Ingenieurleistung der „wesensfremden Führung durch den Zufall“ zu entziehen. (WÖGERBAUER 1943,

S. IV). Zu diesem Zweck entwickelt er ein detailliertes Ablaufmodell für die „Entwicklungsphasen der Konstruktion eines Erzeugnisses“, welches ein schrittweises Fortschreiten von der Aufgabenstellung bis zur abschließenden Ausfertigung aller notwendigen Fertigungsunterlagen beschreibt (Abbildung 2-2).

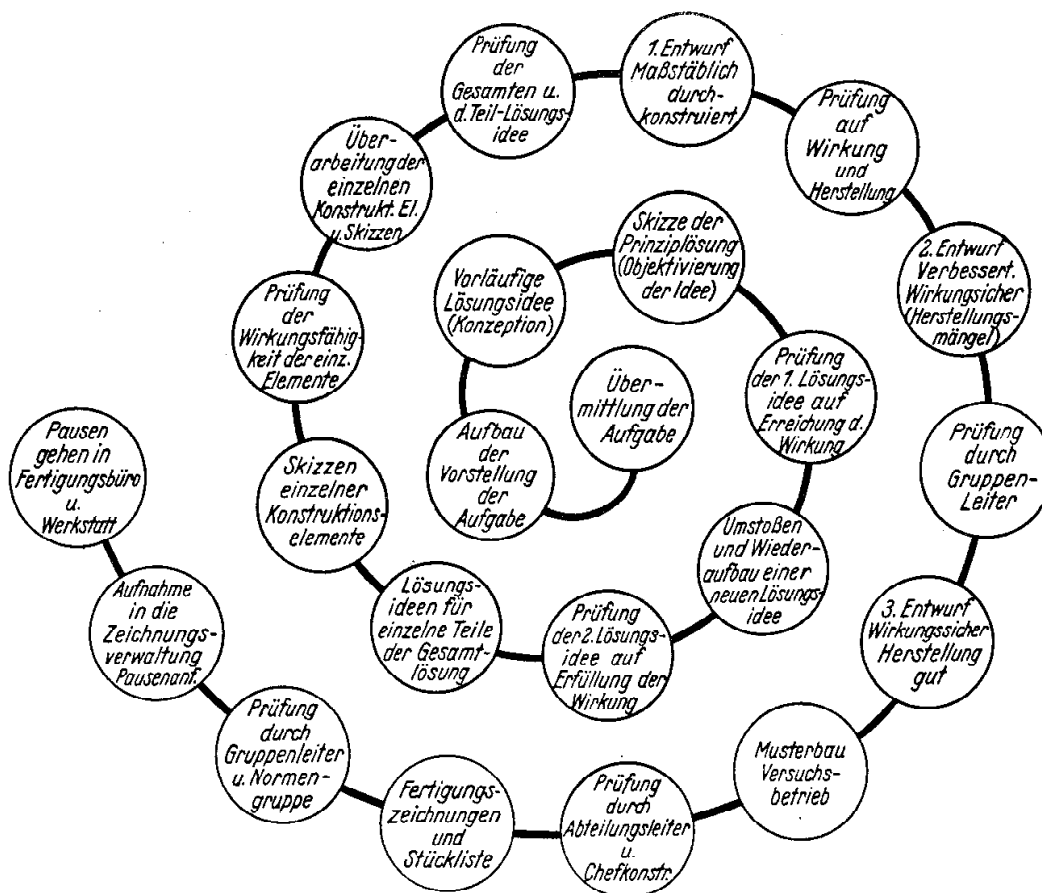


Abbildung 2-2: Konstruktionsprozess nach WÖGERBAUER 1943, S. 6

Weiter gliedert er die Gesamtaufgabe in die Teilaufgaben *Wirkungsweise*, *Baustoff*, *Gestalt* und *Herstellverfahren* und leitet daraus einen *Aufgabenplan* ab (Abbildung 2-3). Dabei handelt es sich „[...] weniger um ein abarbeitbares Phasenschema, als mehr ein die Komplexität der Anforderungen an den Konstrukteur erfassendes Relationsnetz, das heuristische Hilfen für die Aufgabenlösung zu geben vermag.“ (HUBIG ET AL. 2000, S. 390) „Von den zahlreichen angegebenen Verknüpfungen wird man [jedoch] wegen der fehlenden übergeordneten Gesichtspunkte oft mehr verwirrt als informiert, aber es wird offenbar, was der Konstrukteur zu bedenken hat und was er leisten muss.“ (PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 13)

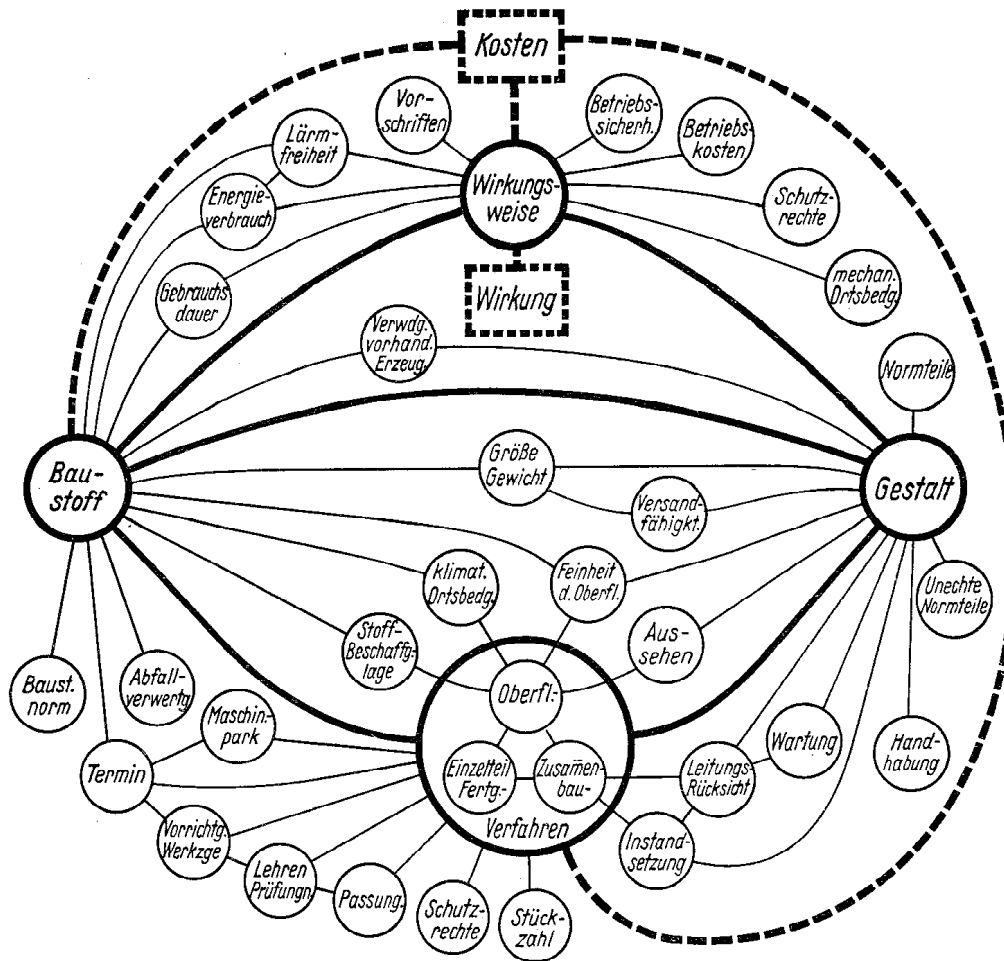


Abbildung 2-3: Verknüpfung von konstruktiven Teilaufgaben zu einem „Aufgabenplan“ (WÖGERBAUER 1943, S. 78)

Auch eine systematische Lösungserzeugung wird vorgeschlagen (WÖGERBAUER 1943, S. 86ff.). Dabei wird ausgehend von einer zunächst mehr oder weniger intuitiv gefundenen Lösung eine systematische Variation nach Grundform, Werkstoff und Herstellung empfohlen. Weitere Kernpunkte sind die notwendige Einschränkung der Lösungsvielfalt, die durch vergleichende Prüfung und Bewertung anhand umfangreicher Merkmallisten geschieht. Wögerbauer weist darauf hin, „[...] dass der für eine praxisnahe Konstruktionslehre notwendig zu berücksichtigende Bereich auch die Denkpsychologie umfassen müsse. Nur auf diese Weise könne eine Methodik des Konstruierens entwickelt werden, die mit den Anforderungen an den Ingenieur, nämlich umfassende Gestaltungsaufgaben zu lösen, Schritt halte.“ (HUBIG ET AL. 2000, S. 391)

Im Mittelpunkt des Ansatzes von KESSELRING 1954 steht die *starke Konstruktion*. „Als Beurteilungsgrößen dienen die technische Wertigkeit einerseits und die wirtschaftliche Wertigkeit andererseits, die in ihrer Gesamtheit die ‚Stärke‘ einer konstruktiven Lösung beschreiben.“ (KESSELRING 1954, S. 206, Hervorhebungen im Original) In seinen *Grundlehren technischen Schaffens* unterscheidet er dabei

- die *Erfindungslehre*, die die Phase der Erzeugung von Lösungen für technische Problemstellungen umfasst und Wege zur gezielten Gewinnung von Erfindungen beschreibt;
- die *Gestaltungslehre*, die aufbauend auf *Gestaltungsprinzipien* durch Gestaltung und Bemessung die technische Wertigkeit bestimmt;
- die *Formungslehre*, die vor allem die wirtschaftliche Wertigkeit optimieren hilft.

Die Erfindungslehre unterscheidet zunächst „intuitive (wahre)“, „entdeckte“ und „errechnete“ Erfindungen (KESSELRING 1954, S. 223f.) In einer „Wegleitung für das Erfinden“ (KESSELRING 1954, S. 228) werden zudem zehn Strategien für das Auffinden „wahrer“ Erfindungen vorgeschlagen, die zum Teil konkrete Handlungsvorschläge enthalten, sich zu einem großen Teil jedoch auf eher banale und fast esoterische Hinweise³ wie z.B. „Immer weiteres Sichhineinsteigern in die Überzeugung, ja beinahe den Wahn, dass sich etwas Besseres finden lasse.“ (KESSELRING 1954, S. 230) beschränken.

Die Gestaltungslehre besteht vor allem aus einem „konvergierenden Näherungsverfahren“ zur Optimierung technischer Konstruktionen (KESSELRING 1954, S. 246ff.), bei dem systematische und vergleichende Beurteilungen mehrerer Entwürfe im Mittelpunkt stehen (Abbildung 2-4). Dabei sind übergeordnete *Gestaltungsprinzipien* zu berücksichtigen, die als allgemeingültige Konstruktionsziele angesehen werden können (KESSELRING 1954, S. 242ff.).

³ Kesselrings Buch ist insgesamt über weite Strecken von einem Sendungsbewusstsein erfüllt, das sich z.T. in einer ausufernden Darstellung – z.T. auch fragwürdiger – Lebensweisheiten erschöpft.

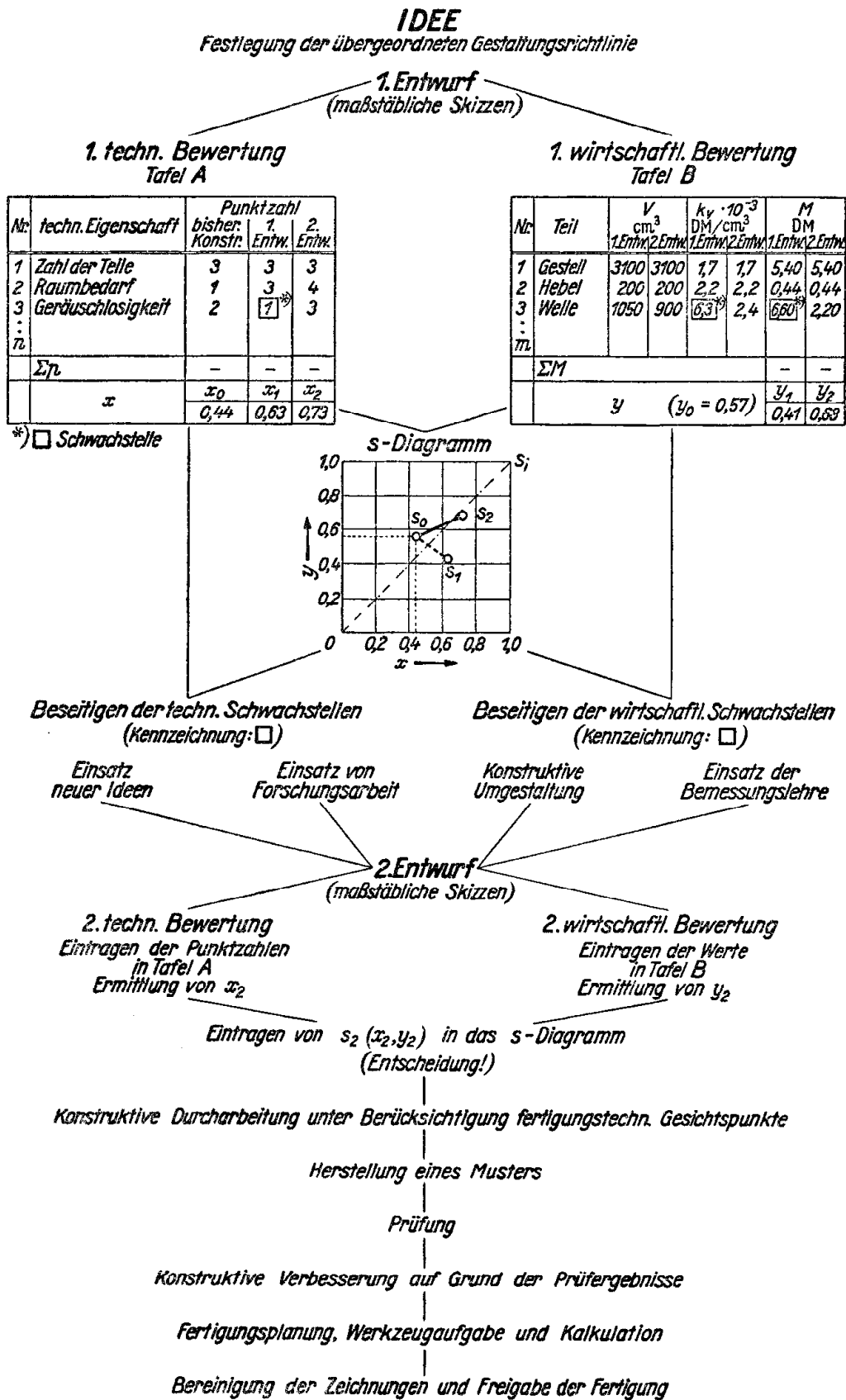


Abbildung 2-4: Gestaltungsplan (KESSELRING 1954, S. 262)

Die Formungslehre schließlich bezieht sich auf Möglichkeiten der optimalen Herstellung, die sich – unter Anwendung von vier Formungsregeln – auf die Minimierung der Her-

stellkosten durch optimale Materialausnutzung konzentrieren (KESSELRING 1954, S. 336ff.). Kesselrings wegweisender Ansatz der technisch-wirtschaftlichen Wertigkeit war die Grundlage für die erst viel später aufgelegte und bis heute fortlaufend aktualisierte Richtlinie VDI 2225 (1964).

In der DDR wurden in den 1950'er Jahren vor allem von Hansen Überlegungen zu einem rationelleren und systematischeren Konstruktionshandeln angestellt (BISCHOFF & HANSEN 1953, HANSEN 1956), die dann 1965 in eine umfassende Konstruktionssystematik mündeten (HANSEN 1965). Dabei werden in einem *Grundsystem* „Beziehungen zwischen einer Aufgabe und ihrer günstigen Lösung“ definiert, „[...] die den Charakter von nicht umgeharen Tatsachen haben.“ (HANSEN 1965, S. 32). Die systematische Analyse der Aufgabenstellung wird als zentraler Erfolgsfaktor betrachtet: „Im Wesenskern der Aufgabe sind alle möglichen Lösungen enthalten.“ (HANSEN 1965, S. 32) Zudem wird eine Begriffshierarchie zur abstrakten, lösungsneutralen Beschreibung technischer Systeme, bestehend aus *Grundprinzip*, *Arbeitsprinzipien* und *Gestaltprinzipien*, sowie der Begriff *Funktion* als übergeordnete Kategorie eingeführt.

Hansen unterscheidet zwei grundsätzliche Phasen des Entwickelns, nämlich das *Konzeptieren*, „[...] bei dem vorwiegend gedanklich und / oder experimentell gearbeitet wird“ und das *Konstruieren*, „[...] das bestimmt ist durch das bildhafte Vorausdenken eines technischen Gebildes.“ Das Konstruieren wird zusätzlich in die Phasen *Entwerfen*, d.h. die „Festlegung einer endgültig ausgewählten Wirkungsweise und Gesamtgestalt“ und *Gestalten*, d.h. die „Erarbeitung einer endgültigen Zustandskennzeichnung mit allen Einzelheiten“ (HANSEN 1965, S. 36) gegliedert. Das dem Konzeptieren nachgeschaltete Konstruieren wird zudem als schrittweise ablaufender Prozess verstanden, für den fünf „Hauptrichtlinien für die Handlungsweise beim Vorausdenken eines technischen Gebildes“ (HANSEN 1965, S. 32) vorgeschlagen werden, bei dem dieses technische Gebilde über vier Entwicklungsstufen schrittweise einem optimalen Zustand zugeführt wird (Abbildung 2-5).

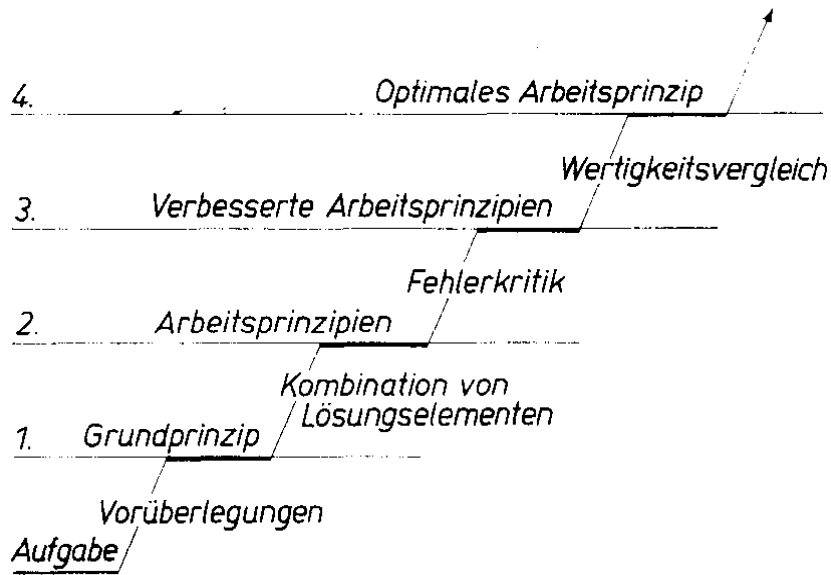


Abbildung 2-5: Das Grundsystem mit den vier Entwicklungsstufen (HANSEN 1965, S. 33)

Diese Vorstellungen stellen ein erstes präskriptives Phasenmodell für das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren dar, das auch ein übergeordnetes Modell der Arbeitsteilung im Produktentstehungsprozess enthält (Abbildung 2-6).

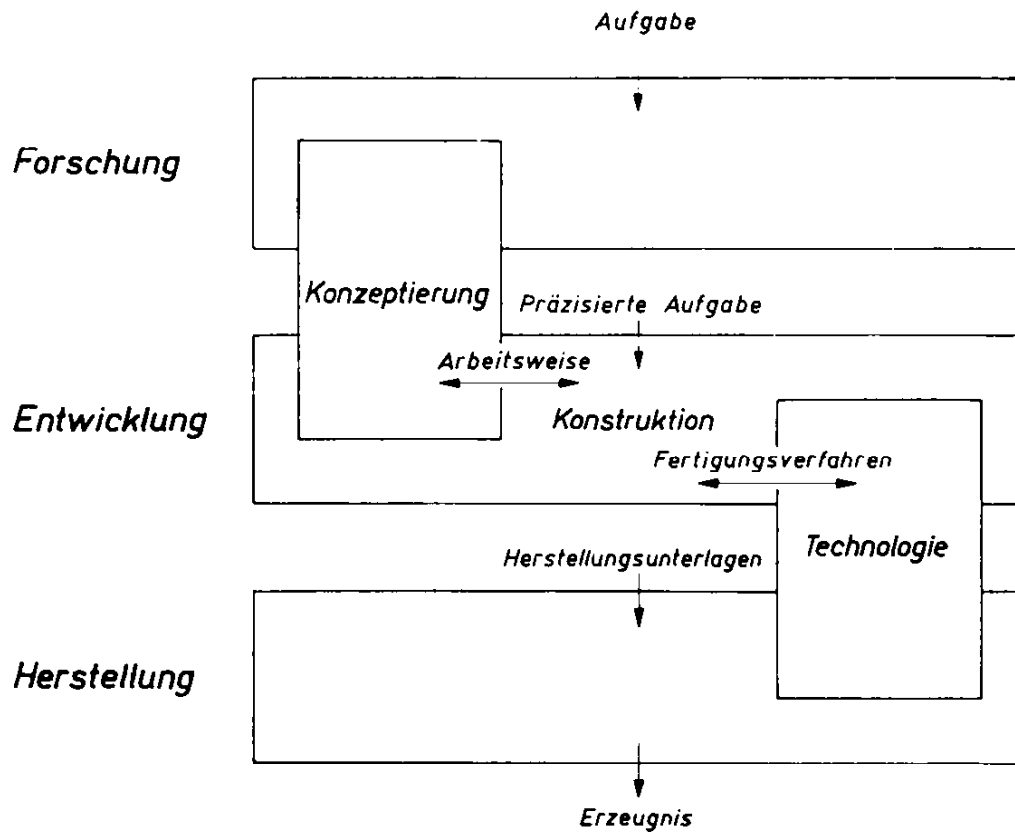


Abbildung 2-6: Zentrale Stellung der Konstrukteure im technischen Geschehen (HANSEN 1965, S. 133)

Diese Arbeiten nehmen eine Reihe der Grundgedanken späterer Konstruktionsmethodik vorweg, insbesondere die Abstraktion der Problem- und Lösungsbeschreibung und die Trennung von Funktion und Arbeitsprinzip, die als Voraussetzung des Systemdenkens in der Konstruktion angesehen werden können.

ZWICKY 1966 entwickelt eine – wohl nur vor dem Hintergrund des Fortschrittsidealismus der 1960'er Jahre denkbare – allumfassende Heilslehre zur Lösung sämtlicher Menschheitsprobleme, das „Morphologische Weltbild“, das als „richtiges“ Weltbild „[...] die Wesenseigenschaften der Objekte und der sie beherrschenden Phänomene der äußeren Welt sowie der geistigen Wesensinhalte der inneren Welten in wahrer, das heißt widerspruchslöser Weise klar und für jeden Menschen verständlich in sich enthält.“ (ZWICKY 1966, S. 34) Hierauf aufbauend präsentiert er seine Idee des „Morphologischen Vorgehens“. Wesentlicher Bestandteil dieses Ansatzes ist „[...] die Entwicklung und der Gebrauch wirksamerer Denk- und Konstruktionsmethoden.“ (ZWICKY 1966, S. 32) Dieses Vorgehen umfasst „[...] bei der Behandlung irgendeines Problems nicht nur die *Totalität aller möglichen Lösungen*, sondern auch [...] die wesentlichen Beziehungen dieser Lösungen zu allen lebenswichtigen Betätigungen.“ (ZWICKY 1966, S. 33, Hervorhebung im Original). Obwohl der Totalitätsanspruch dieser Methode nicht erfüllt werden konnte, bediente sich die Konstruktionsmethodik des von Zwicky vorgeschlagenen und als „morphologischer Kasten“ bezeichneten Werkzeugs zur systematischen Lösungskombination aus bekannten Einzelkomponenten, das „[...] größtmögliche Sicherheit (gibt), dass nichts vergessen wird, was für die Beleuchtung aller Aspekte eines vorgegebenen Problems von Wichtigkeit ist.“ (ZWICKY 1966, S. 88). Der Gedanke der von Vorfixierungen möglichst freien und nichts wesentliches übersehenden Suche nach Lösungen mit Hilfe systematischer Ordnungsschemata ist bis heute Bestandteil der Konstruktionsmethodik.

STEUER 1968 liefert eine „Theorie des Konstruierens in der Konstruktionsausbildung“, die, als Unterrichtsmaterial gedacht, eine sehr kompakte (insgesamt nur 66 Druckseiten starke) Übersicht über den Konstruktionsprozess bietet. Neben dem Rückgriff auf das stufenweise Prozessmodell von HANSEN 1965 und die Gestaltungsprinzipien von KESSELRING 1954 entwickelt Steuer ein Modell der Lösungserzeugung bei dem das Konstruieren als von einer konkreten *Konstruktionsaufgabe* (KA) ausgehender, zunächst abstrahierender Prozess der Formulierung von *Wirkungsprinzipien* (WP) verstanden wird, der durch nachfolgende Konkretisierung zu einer konkreten *Konstruktionslösung* (KL) führt (Abbildung 2-7).

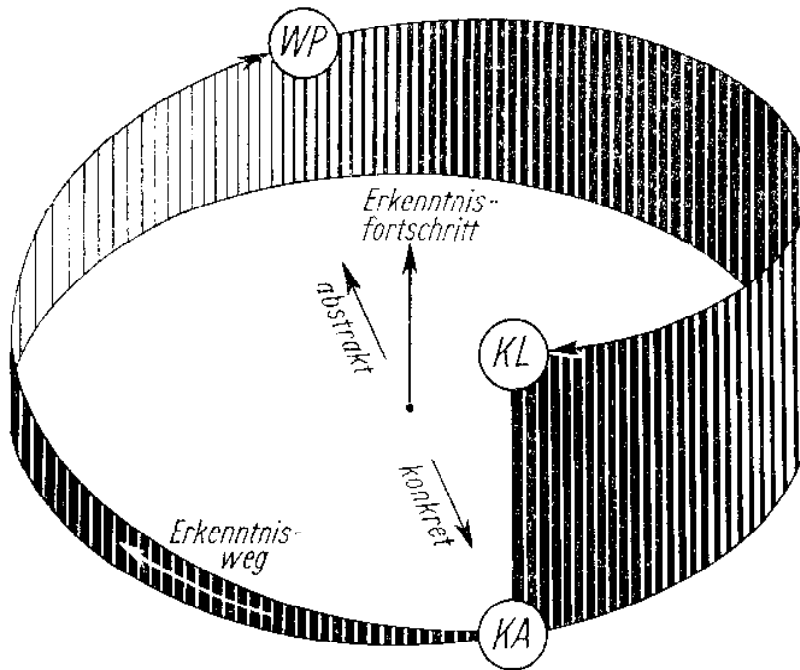


Abbildung 2-7: Erkenntnisprozess beim Konstruieren nach STEUER 1968, S. 22

Interessant ist dabei die Vorstellung, dass jede neue Konstruktionslösung zugleich Ausgangspunkt für eine neue Konstruktionsaufgabe ist, so dass der Prozess der Produktentwicklung niemals abgeschlossen ist. „Jede Konstruktionslösung wird im Laufe der Zeit durch eine bessere abgelöst.“ (STEUER 1968, S. 58). Als wesentliche Methode der Lösungssuche gilt in diesem Ansatz die gezielte Abstraktion, für die eine Reihe von Methoden und Beispielen angegeben werden (STEUER 1968, S. 23ff.). Ziel der Abstraktion ist die Formulierung von Wirkungsprinzipien, die dann durch Variation, Bewertung und Entscheidung stufenweise zu einer Konstruktionslösung konkretisiert werden (Abbildung 2-8).

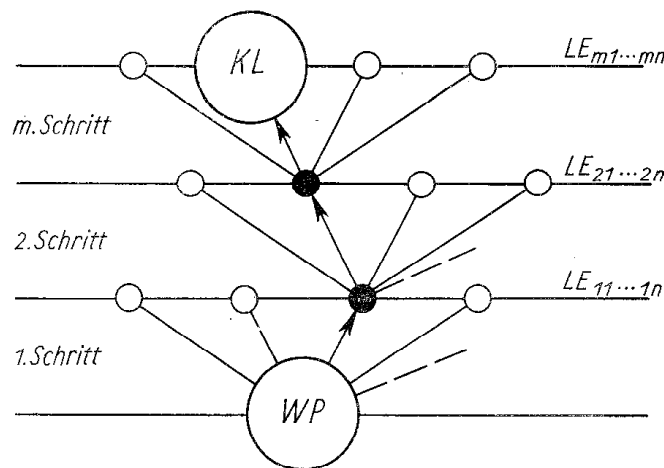


Abbildung 2-8: Lösungserzeugung durch Variation und Konkretisierung (STEUER 1968, S. 35)

RODENACKER 1970 betrachtet das Konstruieren zum einen als psychologischen Vorgang und zum anderen als einen Prozess der Informationsverarbeitung, folgt bei seinem Ansatz aber vor allem dem letzteren Modell, da es unmöglich sei, „[...] eine Anleitung zu

geben, wie man den psychischen Zustand erreicht, der schöpferische Gedanken ermöglicht.“ (RODENACKER 1970, S. 5) Analog zum Aufbau und Ablauf eines physikalischen Experiments entwickelt er ein Prozessmodell des Konstruierens (Abbildung 2-9).

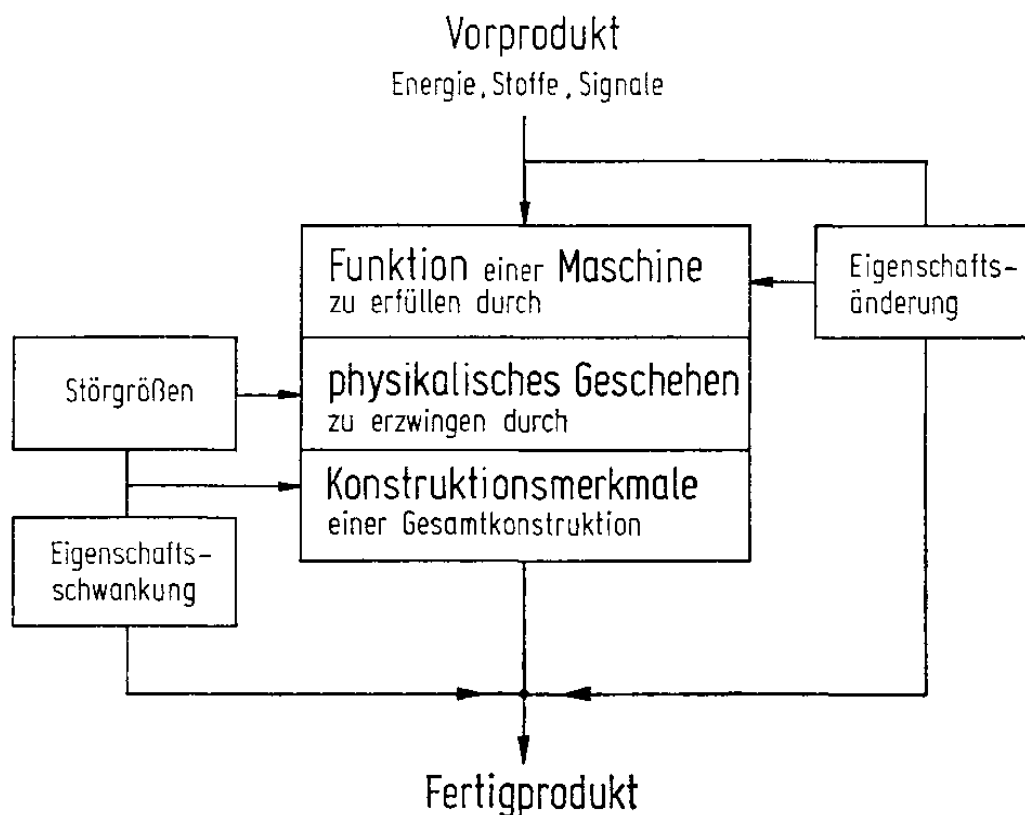


Abbildung 2-9: Arbeitsschritte bei einer Konstruktion (RODENACKER 1970, S. 25)

Seine konkreten Vorgehensvorschläge orientieren sich stark an kombinatorischen Variationsregeln und logischen Verknüpfungen. „Die Funktion oder der Zweck einer Maschine kann als etwas Gedachtes aus logischen Gründen nur aus Verknüpfungs- und Trenngliedern sowie ihrer Verbindung durch Kanäle zur Zu- und Abfuhr des Produktes bestehen. Durch Kombination der Elemente und Anwendung von Schaltungen ergibt sich eine Funktionserweiterung der Grundelemente.“ (RODENACKER 1970, S. 219) Auf einem strikt lösungsneutralen, abstrakten Darstellungsniveau werden zunächst Funktionen definiert, die dann mit geeigneten physikalischen Effekten verbunden werden, so dass prinzipielle Lösungskonzepte entstehen. Die konkreten geometrischen Merkmale der Konstruktion werden anschließend durch Zuordnung bzw. Festlegung von Wirkflächen und Kinematik erzeugt. Es handelt sich dabei um ein strikt hierarchisches Denk- und Vorgehensmodell einer schrittweisen Konkretisierung über verschiedene „Denkebenen“ (Abbildung 2-10).

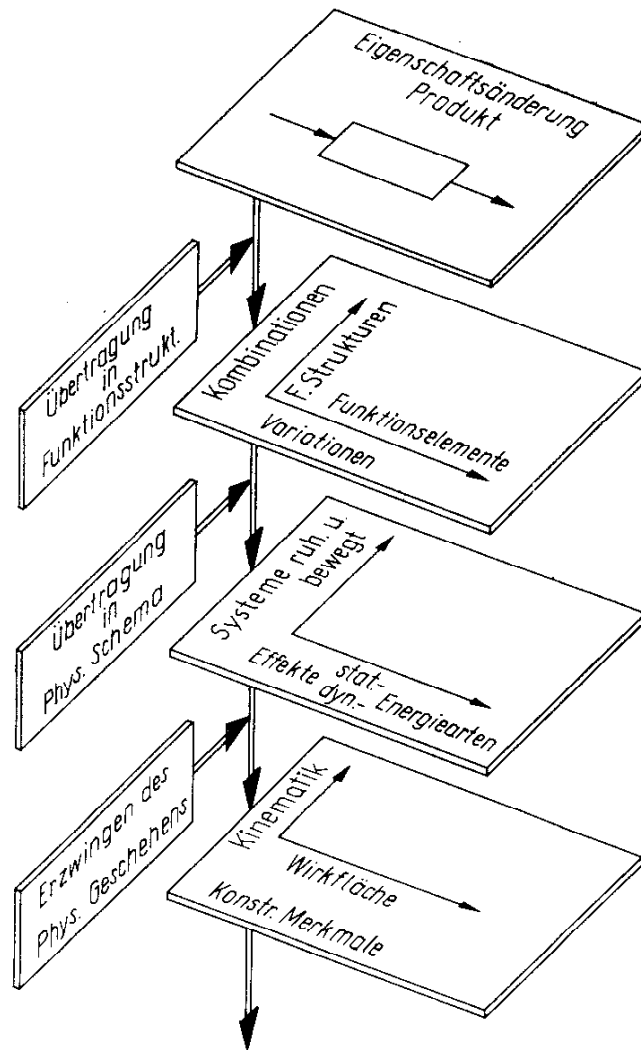


Abbildung 2-10: Denkebenen des Konkretisierens (RODENACKER 1970, S. 220)

Mit der im Entwurf vorgelegten Richtlinie VDI 2222 (1973) wird der Versuch unternommen, die Ansätze zum Konzipieren technischer Produkte zu einem in Wissenschaft und Wirtschaft allgemein akzeptierten Stand der Technik zu integrieren. Sie enthält einen aus vier Hauptphasen bestehenden Vorgehensplan für das Schaffen neuer Produkte (Abbildung 2-11) sowie eine Vielzahl konkreter Methoden und Hilfsmittel, die diesen Hauptphasen zugeordnet werden.

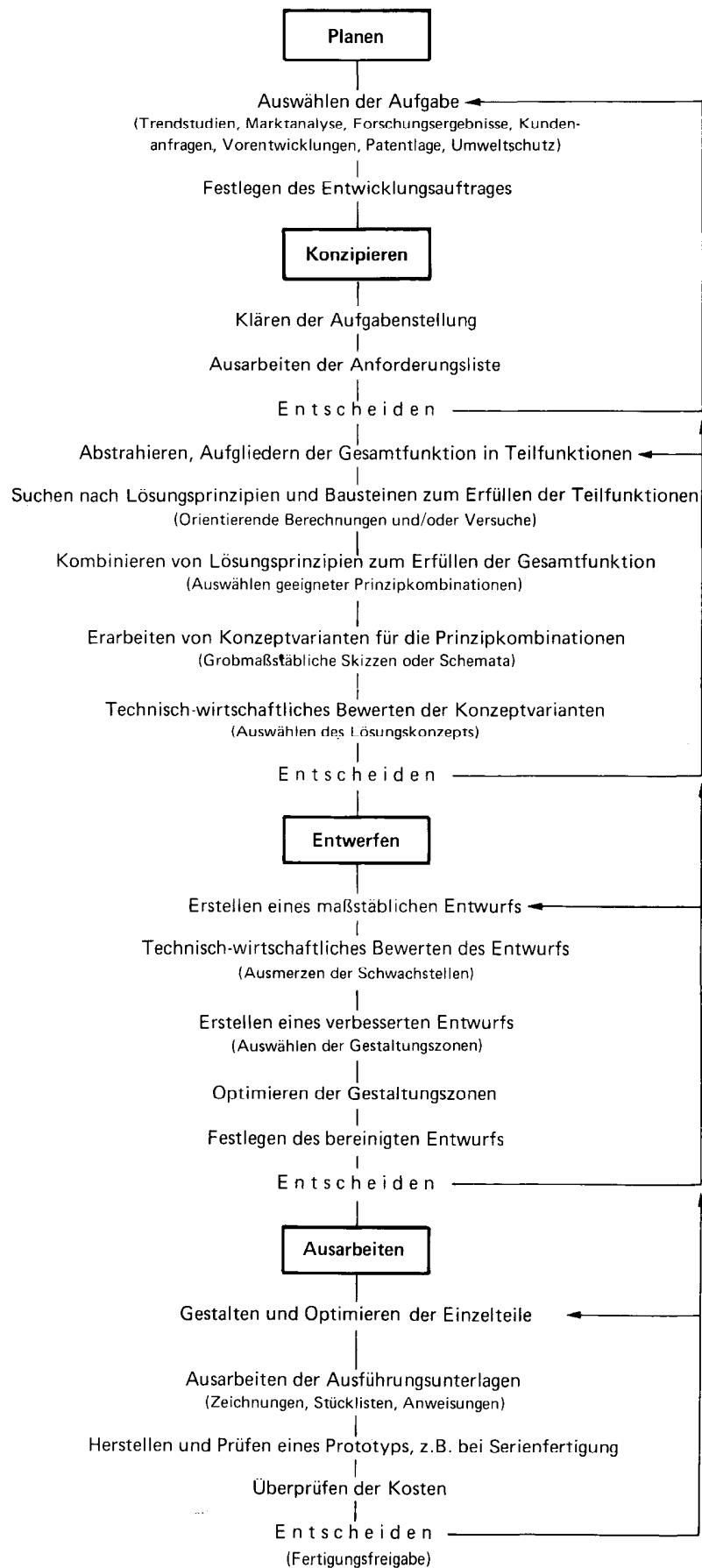


Abbildung 2-11: Vorgehensplan für das Schaffen neuer Produkte (VDI 2222 (1973), S. 3)

Weiter werden Vorgehensvorschläge und unterstützende Methoden für die Produktplanung und das Konzipieren dargestellt. Dabei nehmen Methoden zur Lösungsfindung einen großen Raum ein (VDI 2222 (1973), S. 16ff.).

Den systemtechnischen Denkansatz führt HUBKA 1973 (und parallel auch HANSEN 1974) explizit in die konstruktionsmethodische Diskussion ein. Technische Systeme werden dabei als deterministische Systeme beschrieben und als *Black Box* modelliert, die *Operanden* unter Anwendung von *Operatoren* transformieren. Solche *Maschinensysteme* lassen sich durch ihre *Struktur* und ihr *Verhalten* beschreiben. Maschinensysteme sind zudem Teil eines übergeordneten Systems, das Hubka als *technischen Prozess* bezeichnet (Abbildung 2-12).

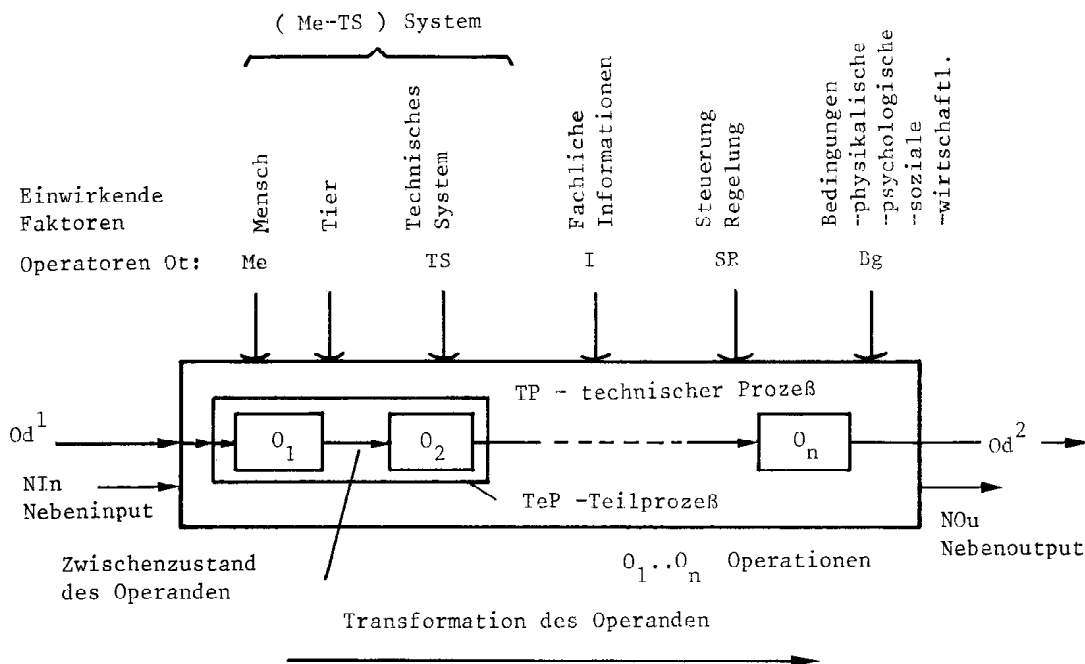


Abbildung 2-12: Allgemeines Modell des technischen Prozesses (HUBKA 1973, S. 25)

Hubka liefert außerdem eine Klassifikation von Maschinensystemen nach verschiedenen Kriterien wie Funktion, Arbeitsprinzip oder Produktionsart (HUBKA 1973, S. 32ff.) und versucht eine vollständige Darstellung möglicher *Konstruktionseigenschaften* von Maschinensystemen und möglicher Beziehungen solcher Eigenschaften untereinander (HUBKA 1973, S. 44ff.). Das Streben nach vollständiger Erfassung sämtlicher denkbarer – auch historischer – technischer Systeme in diesem Modell führt jedoch dazu, dass potenzielle Abhängigkeiten zwischen allen denkbaren technischen Systemen, allen denkbaren Eigenschaften dieser Systeme und allen denkbaren Einflussgrößen postuliert werden, so dass schlussendlich nur die Aussage bestehen bleibt, dass buchstäblich alles mit allem zusammenhängt – eine Aussage von geringem praktischen Nutzen (vgl. z.B. Abbildung 2-13).

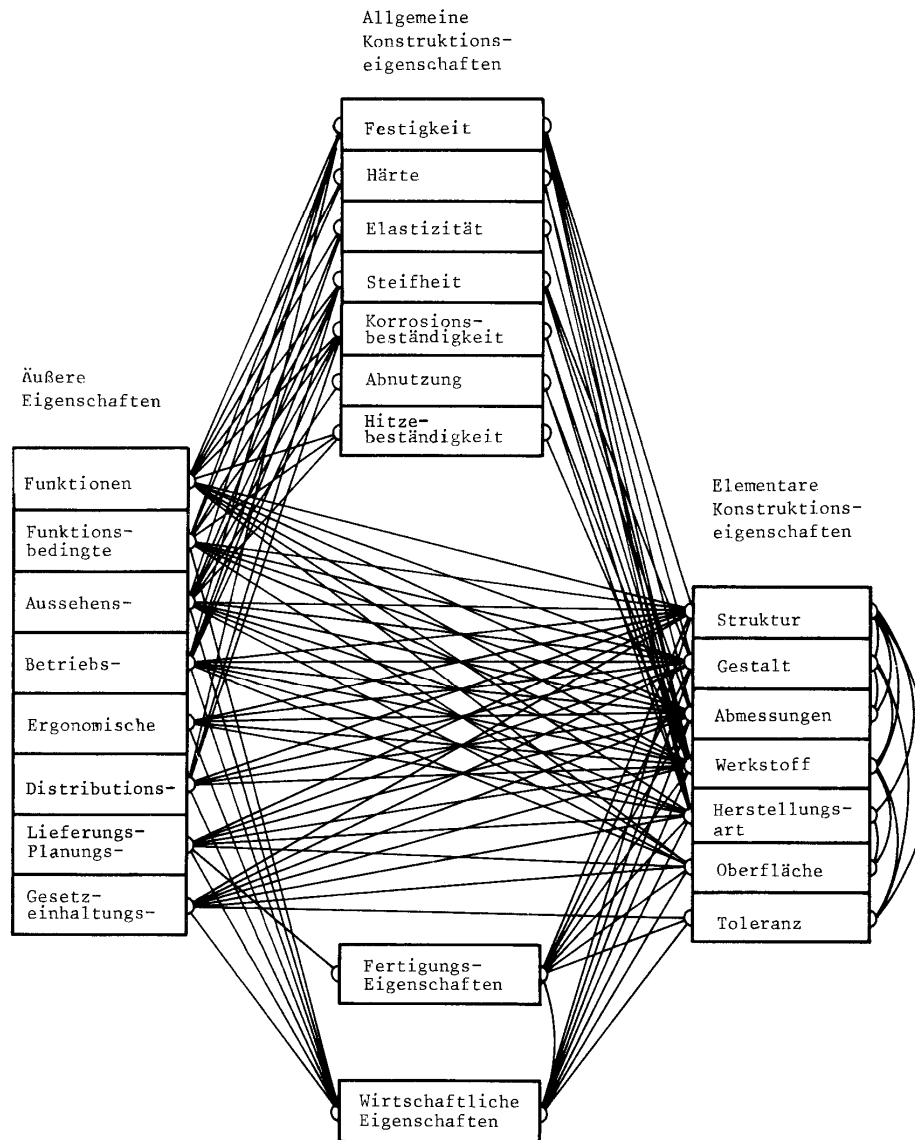
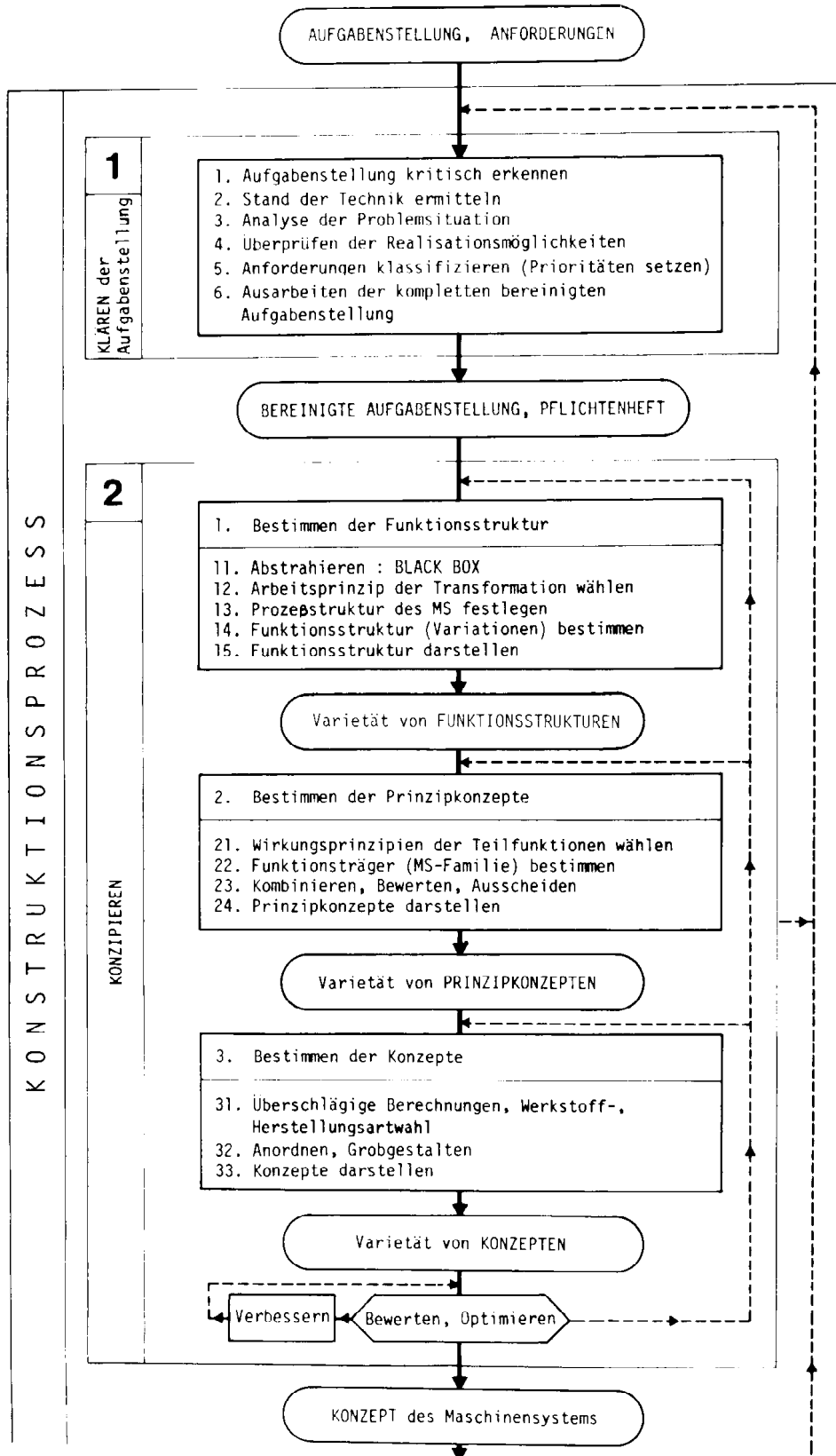


Abbildung 2-13: Beziehungen zwischen Konstruktionseigenschaften (HUBKA 1973, S. 80)

HUBKA 1976 liefert als weiteren Baustein seiner Konstruktionslehre ein allgemeines Modell des Konstruktionsprozesses als Prozess der Informationsverarbeitung, das in seinem Streben nach vollständiger Abbildung aller denkbaren Prozesse jedoch ebenso abstrakt bleibt, wie sein Modell technischer Systeme (vgl. HUBKA 1976, S. 16). Dieses allgemeine Modell enthält jedoch als Untersystem ein Phasenmodell des Konstruierens, das sich mit seinen *Konstruktionsetappen Klären der Aufgabenstellung, Konzipieren, Entwerfen* und *Ausarbeiten* weitgehend durchgesetzt hat (HUBKA 1976, S. 92ff.) und auf ein verallgemeinertes Vorgehensmodell führt (Abbildung 2-14).



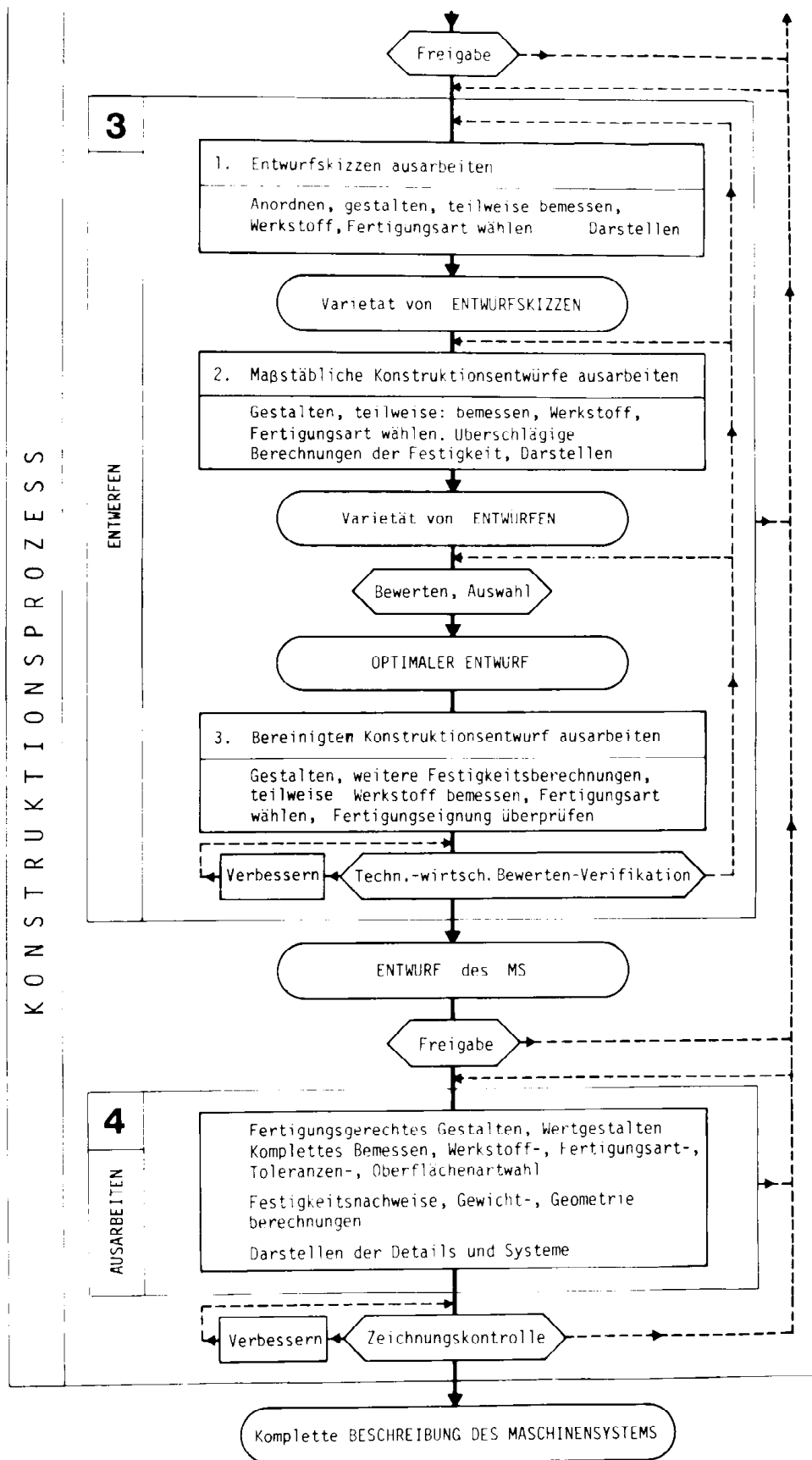


Abbildung 2-14: Verallgemeinertes Vorgehensmodell beim Konstruieren (HUBKA 1976, S. 96f.)

In HUBKA 1984 wird dieser Ansatz erweitert und in Teilen überarbeitet. Zusammen mit Eder verbindet Hubka außerdem seine Theorie technischer Systeme mit derjenigen der Konstruktionsprozesse in HUBKA & EDER 1992 zu einer *Konstruktionswissenschaft*.

Auch ROTH ET AL. 1971 orientieren sich am systemtechnischen Denkansatz und entwickeln ein „algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen“, das u.a. ein Phasenmodell des Konstruierens enthält (Abbildung 2-15).

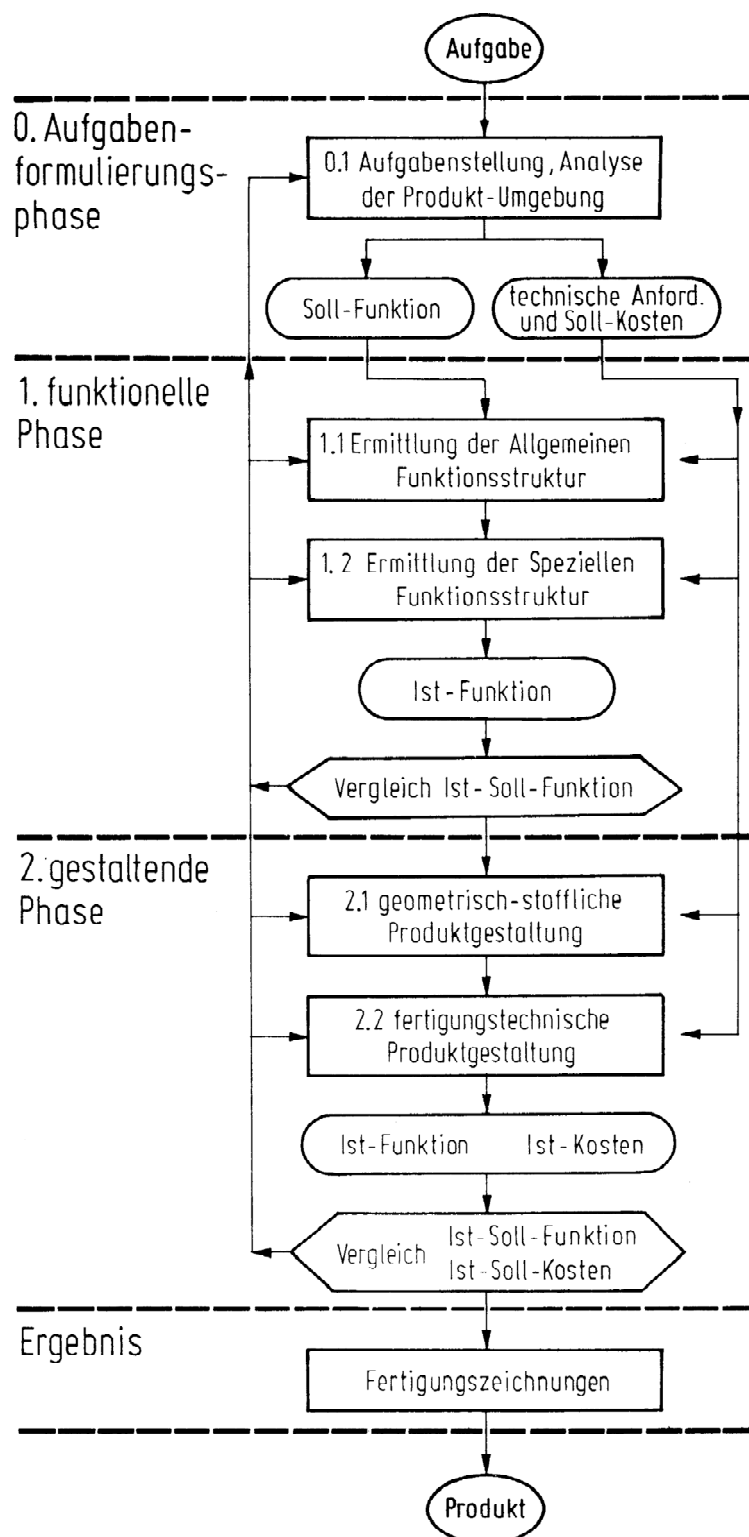


Abbildung 2-15: Arbeitsschritte des Konstruierens nach ROTH ET AL. 1971 (zit. nach PAHL & BEITZ 1977, S. 14)

Das konkrete Vorgehen besteht dabei aus dem Aufbau einer Funktionsstruktur, die aus elementaren Grundfunktionen besteht. Für diese elementaren Grundfunktionen sind denkbare Wirkprinzipien und konkrete Umsetzungen in Konstruktionskatalogen erfasst, die unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der konkreten Aufgabenstellung durch „algorithmische Auswahl“ mit der Funktionsstruktur ver-

knüpft werden können. So entstehen prinzipielle Lösungsvarianten auf deduktivem Wege. Dieses zunächst in einer Aufsatzreihe vorgestellte Konzept wurde von ROTH 1982 geschlossen in seinem Lehrbuch „Konstruieren mit Konstruktionskatalogen“ dargelegt, das sich zu einem inzwischen in dritter Auflage verlegten Standardwerk entwickelt hat (ROTH 2000).

KOLLER 1976 betont in seinem ebenfalls stark algorithmischen Ansatz physikalische Zusammenhänge, die er in 24 Elementarfunktionen bzw. Grundoperationen abbildet, mit deren Hilfe sich unter Anwendung Boolescher Algebra sämtliche technischen Systeme darstellen und entwickeln lassen. Sein *Produktentstehungsprozess* gliedert sich in drei Phasen, die wiederum in eine Vielzahl von *Stationen* und *Tätigkeiten* zerfallen (Abbildung 2-16).

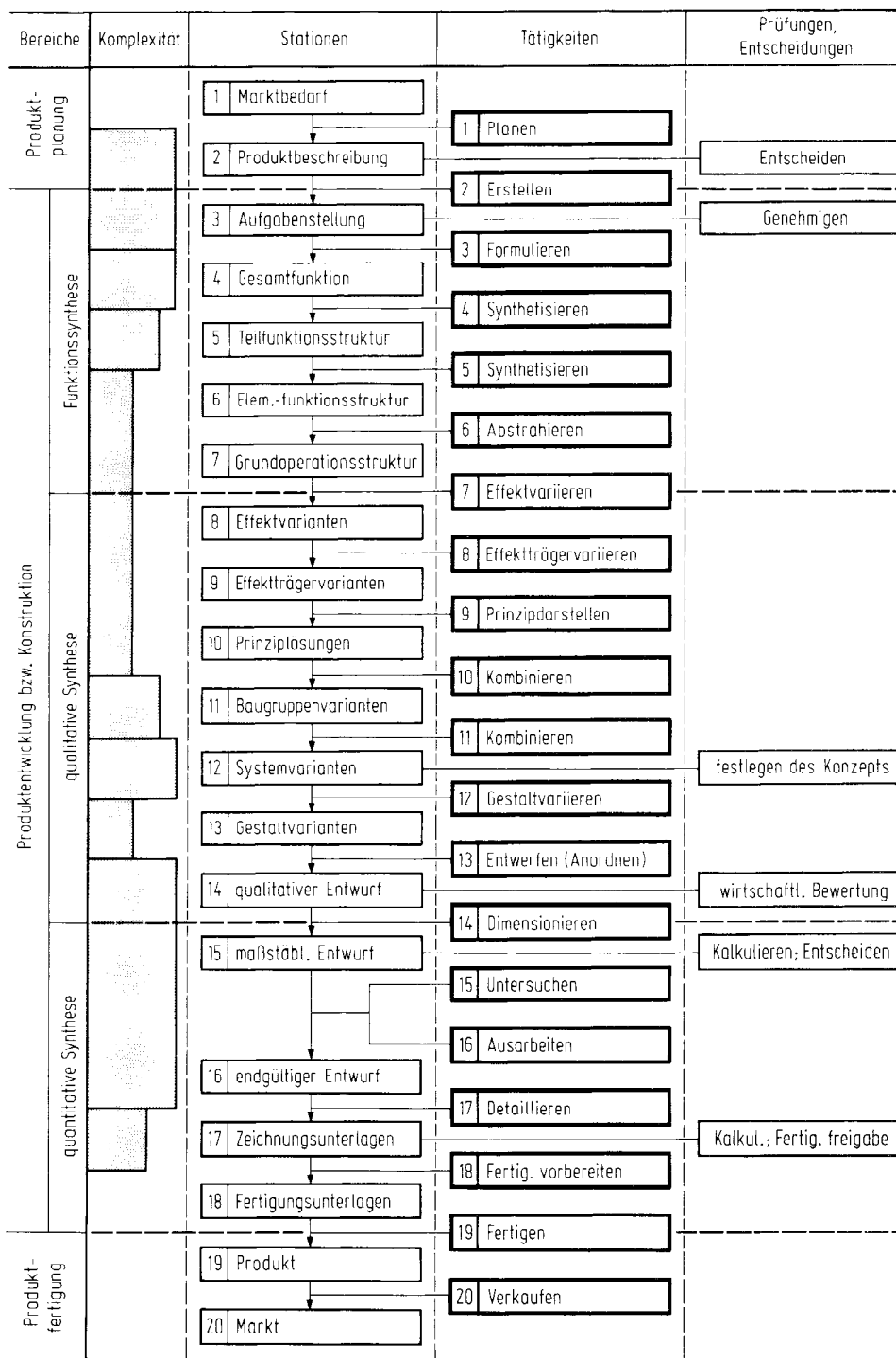


Abbildung 2-16: Stationen und Tätigkeiten des Produktentstehungsprozesses (KOLLER 1976, S. 9)

Wie Roth liefert auch Koller umfangreiche Kataloge mit Arbeitsprinzipien für die Erfüllung von Elementarfunktionen bzw. Grundoperationen.

PAHL & BEITZ 1977 versuchen in ihrem „Handbuch für Studium und Praxis“ unter Rückgriff auf Hansen, Rodenacker, Roth und Koller sowie die VDI-Richtlinie VDI 2222 die Integration der vor dem Hintergrund verschiedener Branchen und Fachgebiete entstandenen Ansätze zu einer „umfassenden Konstruktionslehre für den allgemeinen Maschi-

nen-, Geräte- und Apparatebau“. (PAHL & BEITZ 1977, S. 22f.) Sie stellen fest, dass allen damaligen Ansätzen zum methodischen Konstruieren

- das Abstrahieren der Aufgabenstellung,
- die Verwendung allgemein einsetzbarer Funktionen,
- die Betonung des physikalischen Geschehens als erster Realisierungsstufe,
- ein schrittweises Vorgehen von einer qualitativen zu einer quantitativen Phase und
- die gezielte Variation und Kombination von Lösungselementen

gemeinsam ist und machen diese Punkte zu Eckpfeilern ihres Konzeptes. Der Konstruktionsprozess gliedert sich auch bei ihnen in vier Hauptphasen (Abbildung 2-17).

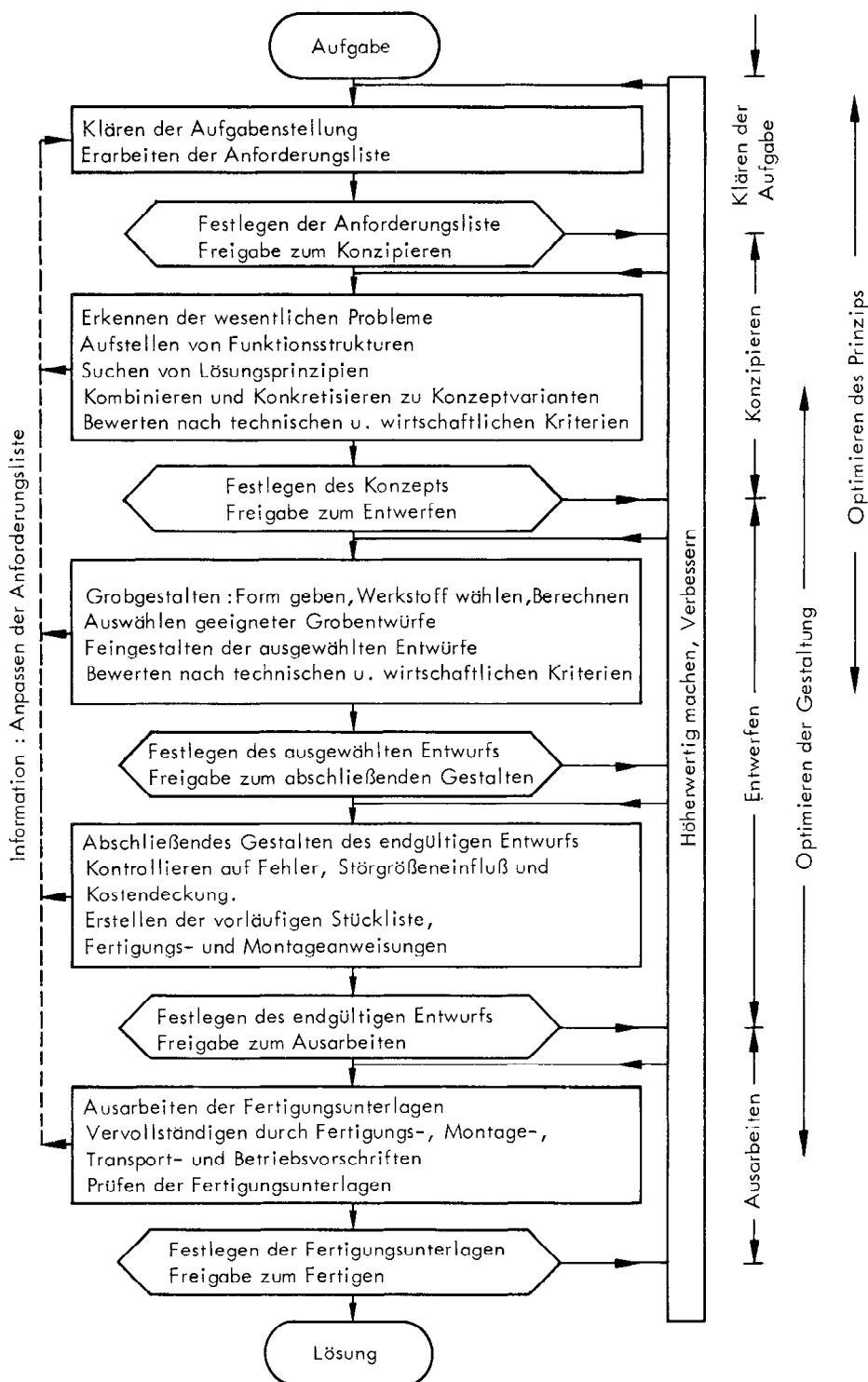


Abbildung 2-17: Arbeitsschritte beim Konstruieren (PAHL & BEITZ 1977, S. 52⁴)

Für das konkrete Vorgehen lösen sie sich dabei weitgehend von den rein algorithmischen Vorstellungen von Roth und Koller und halten eine „einseitige Betonung diskursiven Vorgehens“ für „unbefriedigend und für den Konstrukteur nicht voll einsetzbar“ und schlagen vor, das Konstruieren auch als Lernprozess zu interpretieren, um „[...] für das

⁴ Dieses Ablaufmodell wurde in folgenden Auflagen noch um die Produktplanungsphase erweitert, ansonsten jedoch fast unverändert beibehalten (vgl. PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 170)

Konstruieren mit Hilfe der Methoden der Regelungstechnik eine ständige Rückkopplung des Konstruktionsergebnisses auf das Vorgehen zu bewirken und die Korrelation von Konstrukteur und Umwelt sowie die Möglichkeiten menschlicher Denkprozesse zu erfassen.“ (PAHL & BEITZ 1977, S. 20) Sie orientieren sich dabei an einem „allgemeinen Lösungsprozess“ (S. 47ff.), der auf alle Konstruktionsphasen und –probleme anwendbar sei (Abbildung 2-18).

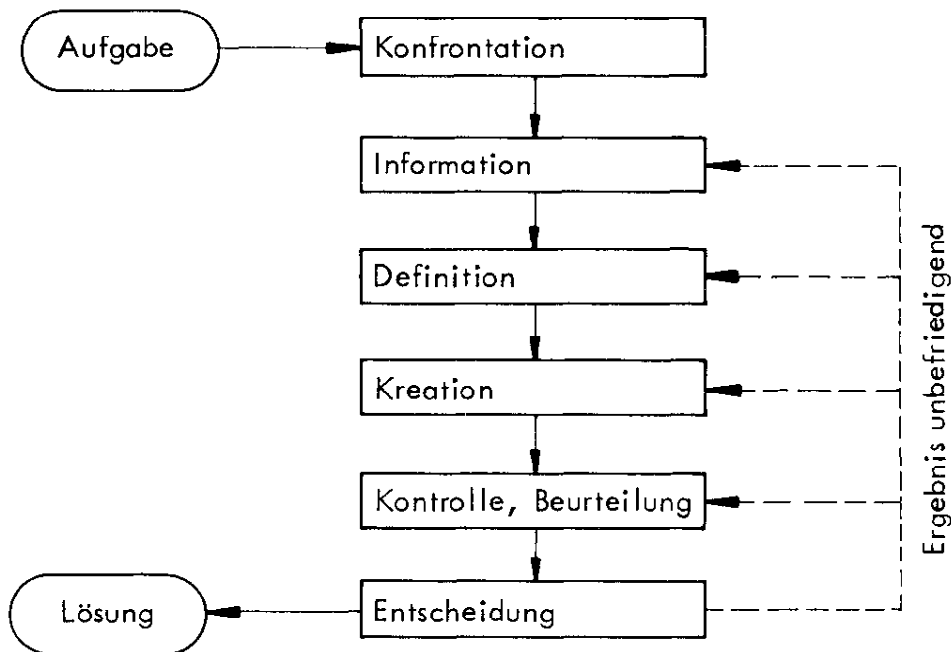


Abbildung 2-18: Allgemeiner Lösungsprozess (PAHL & BEITZ 1977, S. 48)

Aufbauend auf diesem kognitiven Modell werden Arbeitsschritte für alle Teilphasen ihres Prozessmodells abgeleitet (vgl. z.B. Abbildung 3-29, S. 109 und Abbildung 3-30, S. 111), die als konkrete Handlungsanweisungen für die Praxis verstanden werden.

Damit zielen Pahl und Beitz stärker als andere Autoren auf die direkte Einführung konstruktionsmethodischer Strategien und Vorgehenspläne in die Produktentwicklungspraxis. Sie stellen menschliche Arbeitsprozesse und individuelle Vorgehensweisen – mit deutlich präskriptivem Anspruch – in den Vordergrund und fokussieren weniger auf die theoretische Durchdringung von Produkt- und Prozessmodellen. Dieses wird in späteren Auflagen noch deutlicher, in denen „Denkpsychologische Zusammenhänge beim Problemlösen“ in einem eigenen Kapitel dargelegt werden (vgl. z.B. PAHL & BEITZ 1997, S. 59ff.). Dieses eher praxisorientierte Konzept spiegelt sich auch darin, dass diskursives Denken zwar als übergeordnete Strategie zur Fehlervermeidung empfohlen wird, konventionelle Methoden der Lösungsfindung und Methoden zur Unterstützung intuitiv betonter Lösungssuche jedoch als wichtige und typische Arbeitsweisen von Konstrukteuren einen großen Raum einnehmen. Zudem liefern Pahl und Beitz einen aus Gestaltungsregeln, -prinzipien und -richtlinien bestehenden praxisorientierten Rahmen für das methodische Vorgehen auch bei der konkreten Geometrieerzeugung in der Entwurfsphase.

Dieses Standardwerk von Pahl und Beitz wurde ständig erweitert, blieb aber in seinen Kernaussagen und Modellverstellungen bis heute unverändert. Es liegt in inzwischen fünfter Auflage (PAHL & BEITZ ET AL. 2003) vor, wurde in acht Sprachen übersetzt und hat unzweifelhaft die Entwicklung präskriptiver Konstruktionsmethodik am nachhaltigsten geprägt.

In der Richtlinie VDI 2221 (1986) wurde – unter der Leitung von Beitz – der Versuch unternommen, die verschiedenen Bemühungen um eine branchenübergreifende und den gesamten Produktentwicklungsprozess umfassende Definition einer einheitlichen Konstruktionsmethodik im deutschsprachigen Raum zu integrieren und als allgemein anerkannten Stand der Technik zu definieren. Im Mittelpunkt steht dabei ein Phasenmodell des generellen Vorgehens beim Entwickeln und Konstruieren, das aufbauend auf den in der Richtlinie VDI 2222 (1977) definierten Vorgehensplan für das Schaffen neuer Produkte entwickelt wurde (Abbildung 2-19).

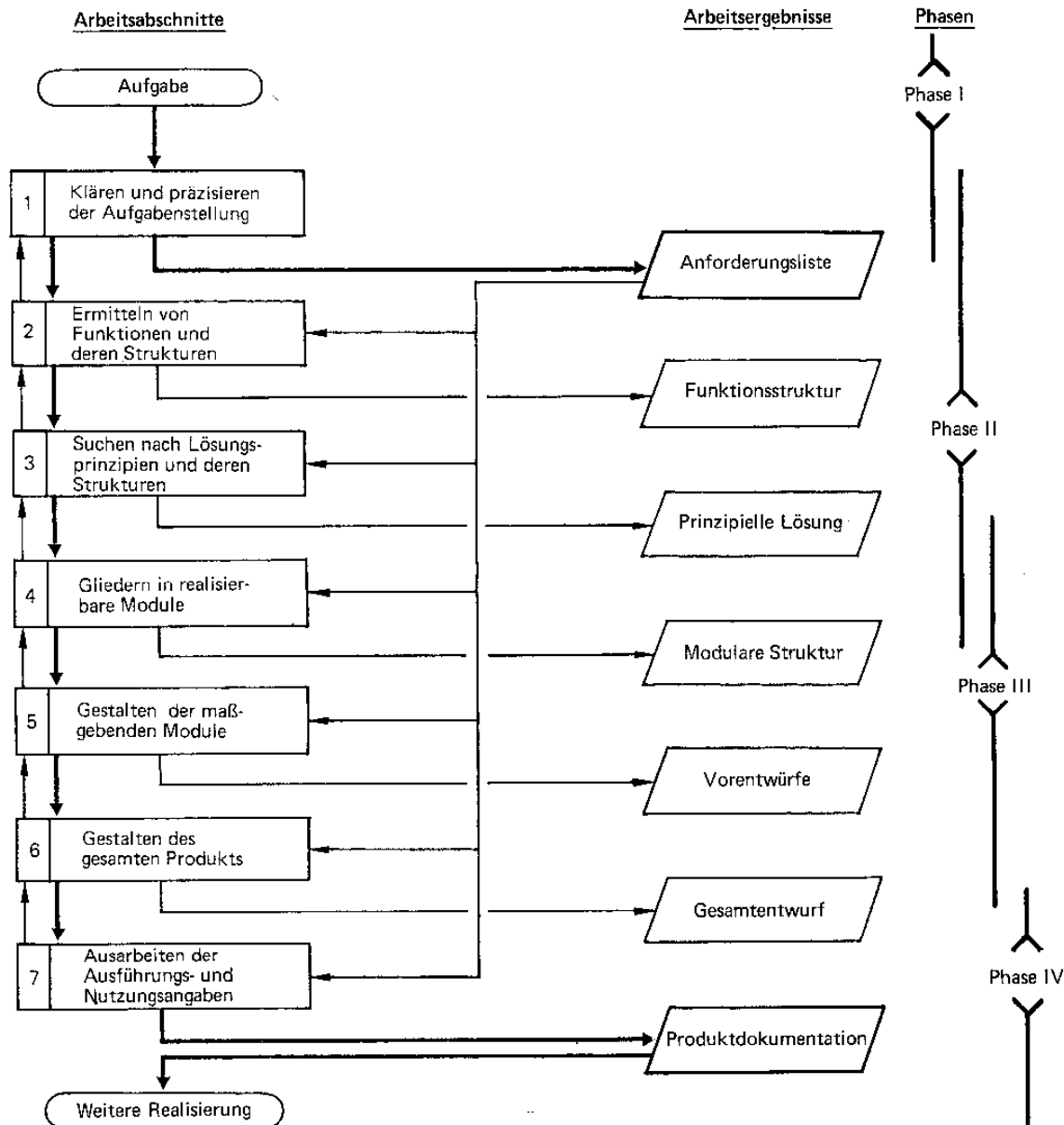


Abbildung 2-19: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221 (1986), S. 8)

An Beispielen aus dem Maschinenbau, der Verfahrenstechnik, der Feinwerktechnik und der Softwareentwicklung wurde dabei die allgemeine Anwendbarkeit dieser Vorgehensweise auf verschiedenste Entwicklungsaufgaben demonstriert. Dieses Prozessmodell sollte insbesondere auch Grundlage für die Entwicklung einer neuen Generation von CAD-Systemen werden, dessen Architektur in der zweiten Ausgabe der Richtlinie skizziert wird (VDI 2221 (1993), S.14f.). Mit dieser Richtlinie kommt die Entwicklung präskriptiver Konstruktionsmethodik im deutschsprachigen Raum zu einem gewissen Abschluss.

Auch Ehrlenspiel (EHRENSPIEL 1995, EHRENSPIEL 2003) geht in seinem Konzept der *Integrierten Produktentwicklung* vom Vorgehensmodell der Richtlinie VDI 2221 (1993) aus (EHRENSPIEL 1995, S. 204ff.), bettet dieses jedoch in einen übergeordneten Prozess der *Produkterstellung* unter Beteiligung anderer Funktionsbereiche wie Produktion, Vertrieb,

Materialwirtschaft oder Controlling ein. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der „[...] Überwindung von Problemen der heutigen, stark arbeitsteiligen Produkterstellung [...]“ (EHRENSPIEL 1995, S. 150) und der Einführung kooperativer Arbeitsprozesse, die darauf zielen, „[...] durch eine gemeinsame Zielrichtung Qualität, Zeiten und Kosten der Produkterstellung und des Produkts positiv zu beeinflussen.“ (EHRENSPIEL 1995, S. 150) Ehrlenspiel führt so moderne Managementkonzepte aus den Bereichen Organisation, Teamarbeit, Projektmanagement, Zeit- und Ressourcenplanung, Kostenbeeinflussung und Mitarbeiterführung in die konstruktionsmethodische Diskussion ein.

Zusammenfassend lässt sich also der heutige Stand der präskriptiven Konstruktionsforschung durch folgende Merkmale charakterisieren:

- die Beschreibung technischer Artefakte als *Systeme* unter Verwendung lösungsneutraler Konzepte der Produktmodellierung wie *Anforderung*, *Funktion* oder *Wirkprinzip*;
- ein Verständnis des individuellen Entwurfshandelns als komplexes, kognitives Problemlösen;
- die Gliederung des Produktentwicklungsprozesses in sequentielle Phasen und Arbeitsschritte, die als präskriptive Handlungsleitlinie von der abstrakten Aufgabenstellung zur konkreten Lösung führen sollen;
- die Betonung der Bedeutung der „frühen Phasen“ – d.h. Aufgabenanalyse, Anforderungsermittlung und Konzeptphase – für den Produktentwicklungserfolg;
- die – optionale oder sogar zwingende – Zuordnung unterstützender Konstruktionsmethoden zu jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses;
- die Betonung diskursiver Methoden bei der Lösungsfindung und -beurteilung zur Fehlervermeidung und Verminderung des Entwicklungsrisikos.

Konzepte der algorithmischen Lösungserzeugung spielen noch immer eine Rolle in der Diskussion über unterstützende CAD-Systeme für die frühen Phasen der Produktentwicklung, treten in der Diskussion über die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethodik jedoch zunehmend in den Hintergrund.

2.2 Anwendbarkeit und Akzeptanz präskriptiver Konstruktionsmethodik

Von Beginn an gab es vor allem aus der industriellen Produktentwicklungspraxis auch kritische Stimmen zu konstruktionsmethodischen Konzepten und Vorgehensempfehlungen.

So stellt RITTEL 1972 fest, dass die Konstruktionsmethodik als Reaktion auf veränderte Randbedingungen der Produktentwicklung vor allem der Problembeschreibung und -klärung dient. „The main purpose of design methodology seems to be to clarify the nature of the design activity and of the structure of its problems. This role of design methodology seems to me to be much more important than its practical use in dealing with concrete problems.“ (RITTEL 1972, S. 317) Als Hindernisse für einen Einsatz in der Pra-

xis sieht er vor allem den erhöhten Zeitaufwand, der durch den Einsatz vor allem diskursiver Konstruktionsmethoden entsteht. „[...] The present state of art in methodology is such that it has little economizing effect on design work – in fact it makes it more involved and time-consuming – and you can get away without applying it in most design fields.“ (RITTEL 1972, S. 319) Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass der postulierte sequentielle Charakter von Produktentwicklungsprozessen praxisfremd sei und dass der Zwang zu starker Abstrahierung zu Beginn eines Produktentwicklungsprozesses kognitiv nicht bewältigt werden könne. „[...] These methods are characterized by a number of traits, one of them being that the design process is not considered to be a sequence of activities that are pretty well defined and that are carried through one after the other [...]; another being the insight that you cannot understand the problem without having a solution in mind; and that you cannot gather information meaningfully unless you have understood the problem but that you cannot understand the problem without information about it [...].“ (RITTEL 1972, S. 312, vgl. auch RITTEL & WEBBER 1973)

LEYER 1981 stellt die Frage, „[...] wie es denn neben so viel Wissenschaftlichkeit rundum mit der Kreativität bestellt sei“ (LEYER 1981, S. 48) und kommt „[...] zu dem Schluss, dass es der Konstruktion wohl in mancherlei Belangen fehlt, dass aber der eigentliche ‚Engpaß Konstruktion‘ beim Entwurf, genauer gesagt: beim schöpferischen Gestalten, liegt.“ (LEYER 1981, S. 46)

PAHL & BEELICH 1981 stützen sich in ihren Aussagen auf Untersuchungen in der Industrie und stellen fest, dass „[...] im Allgemeinen nicht nach einer bestimmten Vorgehensweise vorgegangen [wird]. Dies trifft auch dann zu, wenn durch Mitarbeiter oder durch firmeninterne Seminare bestimmte ‚Schulen‘ vorgeprägt sind. Diese Vorprägung wandelt sich offensichtlich im Laufe der Zeit durch Anwendung und Erfahrung zu einem so genannten pragmatischen Vorgehen, das von den jeweilig anstehenden Problemen und der Übernahme von Vorschlägen anderen Schulen bestimmt wird.“ (PAHL & BEELICH 1981, S. 778) Neben der Feststellung einer Reihe positiver Effekte des konstruktionsmethodischen Vorgehens wurde in den untersuchten Industriebetrieben auch Kritik geäußert. „Aus Termin- und Kapazitätsgründen sei es nicht möglich, methodisches Vorgehen – bei sonst grundsätzlich positiver Einstellung – wirksam zu praktizieren. [...] Hier zeigte sich sehr klar, dass diejenige Konstruktionstätigkeit, die im wesentlichen auf Abwicklung von Aufträgen und auf konstruktive Anpassungen aufgrund konkreter Kundenaufträge beschränkt ist, bisher von den neueren Methoden der Konstruktionstechnik nicht oder nur wenig profitieren konnte.“ (PAHL & BEELICH 1981, S. 780) Vor allem aber wurden eine Einschränkung der Kreativität und „Systematik als Selbstzweck“ beklagt. „Mit teilweise starker Vehemenz wurde überwiegend hervorgehoben, dass methodisches Vorgehen Intuition und Kreativität nicht ersetzen könne und auch nicht dürfe. Die individuelle schöpferische Tätigkeit des Einzelnen sollte nicht unnötig eingeengt werden. [...] Mit Nachdruck wurde in diesem Zusammenhang vor einer zu starken Akademisierung und einer Arbeit um der Systematik willen gewarnt.“ (PAHL & BEELICH 1981, S. 780)

JORDEN 1983 konstatiert: „Die als Mittel zur Rationalisierung der Konstruktion entwickelten und seit zwei Jahrzehnten angebotenen Konstruktionsmethoden werden bisher von

der Praxis nur schleppend bis gar nicht bzw. nur in einzelnen Teilen angenommen.“ (JORDEN 1983, S. 487) Die Gründe dafür vermutet er in der Konstruktionsmethodik selbst, die nach Aussagen aus der Praxis „[...] zu kompliziert, zu theoretisch, nicht merkfähig, zu zeitaufwendig (!) [...]“ sei (JORDEN 1983, S. 487f., Hervorhebung im Original). Jordan sieht die Konstruktionsmethodik mit zwei Kernproblemen behaftet, „[...] nämlich einerseits [der] Unklarheit von Begriffen und andererseits [der] Überbewertung logischer Abläufe.“ (JORDEN 1983, S. 488) Die Unklarheit der Begriffe besteht demnach darin, dass das individuelle Vorgehen, das einen *gedanklichen* Ablauf darstellt, nicht sauber vom Entwicklungsprozess in einem Unternehmen, das einen *organisatorischen* Ablauf darstellt, unterschieden wird. Die Überbetonung logischer Abläufe führe auf ein realitätsfernes Vorgehensmodell. „Das menschliche Gehirn arbeitet aber in den seltensten Fällen logisch-schrittweise [...], sondern vielmehr sprunghaft, häufig über Ketten von assoziierten Bildern und Begriffen. Das logisch-kritische Denken wird erst danach zur Überprüfung herangezogen. Daher kann eine logisch aufgebaute Methode niemals dem wirklichen Gedankenablauf entsprechen, und zwar umso weniger, je genauer sie detailliert ist.“ (JORDEN 1983, S. 493)⁵

RIEHM 1983 bezweifelt die Zweckmäßigkeit des Ansatzes, alle technischen Objekte auf eindeutig bestimmbare Grundelemente zurückzuführen und durch Anwendung kombinatorischer Regeln neue Produkte zu entwickeln, da hierbei die Anzahl denkbarer Lösungen explosionsartig ansteige und damit zu einer ebenso großen Anzahl notwendiger, jedoch sehr komplexer Bewertungs- und Auswahloperationen führe. Auch sei eine eindeutige hierarchische Überführung abstrakter Produktrepräsentationen in eine konkrete Gestalt nicht möglich (RIEHM 1983, S. 316ff.). Die Interpretation des Konstruierens als Information verarbeitenden Prozess scheitere ebenfalls an der nicht gegebenen Algorithmisierbarkeit. Zudem werde in diesem Modell „[...] der Problemcharakter der Aufgaben der Neukonstruktion weitgehend ausgeblendet [...]“ (RIEHM 1983, S. 314), der sich darin zeige, „[...] dass die Ausgangsinformationen (Anforderungen) im Konstruktionsprozess, sofern es sich um echte Probleme handelt, nie eindeutig und abschließend am Ausgangspunkt des Prozesses geklärt werden können.“ (RIEHM 1983, S. 318) Ablauf- und Phasenschemata seien zu linear und charakterisierten „[...] den Konstruktionsprozess [...] nur ungenügend, der insbesondere auch durch antizipative Leistungen geprägt ist.“ Die Konstruktionsmethodik fokussiere zu Unrecht auf „[...] die funktionellen Probleme der Neukonstruktion, die aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten am ehesten einer Verwissenschaftlichung und Objektivierung zugänglich sind“ (RIEHM 1983, S. 321), während in der Praxis Anpassungs- und Variantenkonstruktionen tatsächlich weit überwiegen. Die Konstruktionswissenschaft bleibe damit insgesamt einer „[...] einseitigen technischen Betrachtungsweise verhaftet. Der Konstruktionsprozess ist auf der Basis einer Theorie der Maschine im wesentlichen ‚technischer‘ Prozess und nicht Arbeitsprozess, der sowohl technischen Anforderungen genügen muss als auch sozialen und individuellen Gesetzmäßigkeiten, Normen, Ansprüchen etc.“ (RIEHM 1983, S. 322)

⁵ Diese Punkte wurden von JORDEN ET AL. 1985 auch empirisch untersucht und im Wesentlichen bestätigt.

ROPOHL 1983 argumentiert vorwiegend wissenschaftstheoretisch und kritisiert den ausschließlich präskriptiv-normativen Charakter der Konstruktionswissenschaft. Er stellt unter Berufung auf FEYERABEND 1975 fest, dass die Konstruktionswissenschaft „[...] weit davon entfernt ist, die konkrete Wirklichkeit, die sie zu ihrem Gegenstand hat, so zu erfassen, wie sie ist.“ (ROPOHL 1983, S. 328) „Nun müssen sich jedoch normative Theorien immer in gewissem Umfang auf deskriptive Theorien abstützen; denn [es] können Mittel zum praktischen Zweck sinnvollerweise nur dann empfohlen werden, wenn durch eine deskriptive Theorie gesichert ist, dass die betreffenden Mittel tatsächlich Ursache der erwünschten Wirkungen sind [...].“ (ROPOHL 1983, S. 331) Zudem vernachlässige ein „in den Technikwissenschaften vorherrschender Technizismus [...] nicht nur die Entstehungsprozesse, denen Sachsysteme ihre Existenz verdanken, sondern vor allem auch die Verwendungszusammenhänge, in denen technische Sachsysteme ihren Zweck überhaupt erst erfüllen. [...] So leidet denn auch die Konstruktionswissenschaft bislang darunter, dass sie die jeweiligen konstruktiven Aufgabenstellungen nicht systematisch begründen kann.“ (ROPOHL 1983, S. 333f.)

Auch FRANKE 1985 stellt fest, dass nach eigenen Beobachtungen in der Praxis „[...] bei weitem nicht nur oder wenigstens überwiegend ‚methodisch‘ konstruiert [wird].“ (FRANKE 1985, S. 911) Als einen Hauptgrund betrachtet auch er das Problem, dass die damalige Konstruktionsmethodik „[...] das Konstruieren in die Nähe einer algorithmierbaren Vorgehensweise [rückt]. Bei der Behandlung realer Konstruktionsaufgaben treten jedoch in aller Regel Teilaufgaben auf, die nicht vollständig algorithmisch bearbeitet werden können.“ (FRANKE 1985, S. 912) Er folgt Riehms (RIEHM 1983, s.o.) Argumentation, „[...] dass die Problemdefinition nur im Zusammenhang mit der Problemlösung ausgearbeitet werden kann.“ (FRANKE 1985, S. 913) Reale Konstruktionsprobleme seien zudem oft dadurch charakterisiert, dass Entscheidungen getroffen werden müssen, die einen Ausgleich zwischen widersprüchlichen Anforderungen und Zielen darstellen. „Dieser Kompromiss kann nur selten durch vollständig vorgegebene Gewichtungen gefunden werden, sondern bedarf normierender Festlegungen, die stärker einer Willensbekundung als einem deduktiv ableitbaren algorithmischen Schritt entsprechen.“ (FRANKE 1985, S. 913) Die Aufgabenbearbeitung durch Zerlegung in Teilaufgaben und schrittweise Lösungskonkretisierung sei zudem oft unzweckmäßig, da es „[...] Eigenschaften von technischen Systemen [gibt], die sich nur in Bezug auf das Gesamtsystem erklären lassen, z.B. Schwingungsfähigkeit, Gesamtzuverlässigkeit, ästhetisches Erscheinungsbild u.a. [...]. Liegen Konstruktionsaufgaben im Bereich ausgereifter Maschinengattungen, [...] ist ein vollständiger Weg für die Gesamtaufgabe vom Abstrakten [...] bis zur konkreten Produktdokumentation in der Regel unsinnig, da für die Hauptfunktionen langjährig optimierte Lösungsprinzipie feststehen.“ (FRANKE 1985, S. 914) Als die fünf wichtigsten „spezifischen Schwachpunkte“ der Konstruktionsmethodik betrachtet Franke, (FRANKE 1985, S. 916ff.)

- dass das Realisieren *gewünschter* Funktionen gegenüber der Vermeidung *unerwünschter* Effekte übergewichtet werde;

- dass die Konstruktionsmethodik die konkrete Produktgestaltung nur begrenzt unterstützen;
- dass iterative Sprünge zwischen konkreten und abstrakten Schritten nicht dargestellt würden, obwohl diese notwendigerweise aufträten;
- dass das Problem der Lösungsauswahl unterschätzt werde;
- dass ein normiertes Modellsystem zur Darstellung verschiedener Konkretisierungsstufen eines Produktes nicht existiere.

Franke erhebt als Konsequenz aus seiner Kritik, „[...] Forderungen nach einer stärkeren Beschäftigung mit der Entwurfs- bzw. Gestaltungsphase, nach praxisnahen und un-dogmatischen Sprachregelungen in den Vorschlägen zur Methodik und nach einer verstärkten Einbindung psychischer und sozialer Faktoren: Der Konstruktionsprozess ist meist einem Lernprozess ähnlicher als einem Algorithmus.“ (FRANKE 1985, S. 923)

Auf der ICED 85 wurden Herausforderungen an die Konstruktionsmethodik, die sich aus neueren Erkenntnissen der kognitiven Problemlöseforschung ergaben, in einem eigenen Forum „New Impulses for Systematic Engineering Design“ diskutiert.

MÜLLER 1985 kritisiert im Rahmen dieses Forums wie ROPOHL 1983 (s.o.) die mangelhafte empirische Fundierung der Konstruktionswissenschaft. „Nicht selten schrieben die ersten Publikationen [...] einen Denkstil fest und begründeten eine später unbesehen fortgesetzte, bestenfalls kritisch verbesserte, methodische Tradition, welche die Illusion nährt, man betreibe deskriptive Theorie. Gerade diese Illusion aber hindert einzusehen, dass eine exakte Begründung einer Formel, eines Diagramms usw. aus dem technischen Sachverhalt zwar eine notwendige Voraussetzung ist, dass diese objektive Fundierung aber nicht hinreichen kann, menschliche Problemlöseprozesse effektiv zu normieren. Dazu muss auch erforscht werden, wie weit sie dem menschlichen Problemlöser – ebenso objektiv – entspricht.“ (MÜLLER 1985, S. 843, Hervorhebungen im Original) Er beklagt, dass die Frage, inwieweit Methoden bzw. Ablaufschemata, die aus einer Theorie technischer Systeme hergeleitet wurden „[...] auch den neurophysiologischen und psychologischen Gegebenheiten entsprechen, [...] nur in wenigen Fällen zufällig geklärt [wurde]. Die Struktur der Methoden, die Art der Darstellungsart, die Komplexität der Vorschriftenmenge usw. wurden nicht bewertet; die Grenzen nicht abgesteckt und so nicht selten recht unkritisch allgemeine Anwendung empfohlen.“ (MÜLLER 1985, S. 844) „Nachzuprüfen bleibt, ob die heute vorgeschlagenen Orientierungsmittel tatsächlich die Leistung verbessern.“ (MÜLLER 1985, S. 846) Ausgehend von dieser Problemanalyse schlägt er ein umfangreiches, interdisziplinäres, empirisch-deskriptives Forschungsprogramm unter Beteiligung von Konstruktionswissenschaft, Geschichtswissenschaft, Psychologie und (Organisations-)Soziologie vor (MÜLLER 1985, S. 847ff.)⁶

⁶ Müller untersucht in der Folge den empirischen Forschungsbedarf systematisch und definiert eine Reihe konkreter Forschungsfragen für die empirische Forschung (vgl. MÜLLER 1988)

Im gleichen Forum der ICED 85 betont auch SCHREGENBERGER 1985 die Notwendigkeit einer „empirisch-wissenschaftlichen Konstruktionstheorie“ und stellt fest, dass die „Methodikabstizienz der Praxis“ begreiflich sei: „vorliegende Konstruktionsmethodiken sind unter anderem heuristisch zu schwach.“ (SCHREGENBERGER 1985, S. 893) Als Anspruch an den Nutzen der Konstruktionsmethodik fordert er, „[die] Methodik muss in konkreten Problemsituationen klar interpretierbar sein. Sie muss dem Problemlösestil und den Konstruktionserfahrungen entgegenkommen und die Arbeit im Team erleichtern. Sie muss auf effiziente Weise zu überzeugenden, erfolgsträchtigen Entwürfen führen.“ (SCHREGENBERGER 1985, S. 894) An den vorgeschlagenen „Methodiken“ kritisiert er vor allem (SCHREGENBERGER 1985, S. 894):

- „sie sind praktisch unhandlich, missachten den individuellen Arbeitsstil des Konstrukteurs und schlagen von Fall zu Fall seiner Erfahrung ins Gesicht.
- ihre heuristische Kraft ist zu beschränkt.
- sie übergehen die Probleme der Arbeitsteilung im Konstruktionsteam.“

Eine Methodik sei von „beschränkter heuristischer Kraft“, „[...] wenn ihre Anwendung im Schnitt keine evident besseren Problemlösungen und diese auch nicht effizienter hervorbringt als ein rein intuitives bzw. beliebiges Vorgehen.“ (SCHREGENBERGER 1985, S. 894f.) Ursache für die „heuristische Schwäche“ der Konstruktionsmethodik sei „mangelnde methodische Flexibilität“, d.h. eine „zu starre Regelung des Konstruktionsprozesses“ und ihr „dürftiger empirischer Gehalt“. „Eine Beschränkung der empfohlenen Findeverfahren auf wenige, zudem noch algorithmisch fixierte Vorgehensweisen halte ich für die Krux unserer meisten Methodikkonzeptionen. Von daher möchte ich auch das für die Hansen-Tradition zentrale Funktionsstruktur-Konzept auf seinen Platz verweisen. Die Funktionsstruktur-Differenzierung mag in gewissen Fällen von Variantenkonstruktion gewisser Maschinentypen heuristisch fruchtbar sein. Sie ist aber weder methodologisch noch empirisch begründet als die quasi universelle Methode der Problemstrukturierung zu Beginn eines Konstruktionsprozesses.“ (SCHREGENBERGER 1985, S. 895f., Hervorhebung im Original) Zur Behebung dieser Mängel schlägt auch Schregenberger ein umfangreiches, interdisziplinäres empirisches Forschungsprogramm vor.

PARNAS & CLEMENTS 1986 stellen für den Bereich der Softwareentwicklung fest, dass „rationale“ Entwicklungsprozesse in der Praxis kaum zu finden seien. „Most of us like to think of ourselves as rational professionals. However, to many observers, the usual process of designing software appears quite irrational. Programmers start without clear statement of desired behavior and implementation constraints. They make a long sequence of design decisions with no clear statement of why they do things the way they do. Their rationale is rarely explained.“ (PARNAS & CLEMENTS 1986, S. 251) Nach ihrer Auffassung müssen präskriptive Prozessmodelle immer eine Idealisierung darstellen, wofür sie eine Reihe von Gründen anführen. So würden Auftraggeber eines Entwicklungsauftrages ihre Anforderungen selten genau kennen bzw. könnten diese nicht genau formulieren. Deshalb seien wichtige Informationen oft erst in der Implementierungsphase verfügbar, was zu unvermeidbaren Rücksprüngen führe. Es sei außerdem

kognitiv unmöglich, alle denkbaren Anforderungen zu berücksichtigen, eine Auswahl sei immer nötig, was zu notwendigerweise unvollständigen Modellen führe. Externe Einflüsse machten im Prozessverlauf fortlaufend Richtungskorrekturen notwendig und menschliche Fehler sowie individuelle Vorfixierungen seien unvermeidbar. Schließlich sei der Rückgriff auf vorhandene Lösungen anstelle einer idealen Neuentwicklung oft schlicht wirtschaftlicher. Sie plädieren trotzdem für die Beibehaltung präskriptiver Prozessmodelle, jedoch nicht als strikten Vorgehensplan, sondern als idealisierte Leitlinie.

ANDREASEN 1987 vermisst einen problemorientierten Zugang der Konstruktionsmethodik und beklagt ein daraus resultierendes Übersetzungsproblem für die Konzepte der Konstruktionsmethodik beim Transfer in die Praxis. „Application of the existing methods and tools has gained very little ground in industry, because designers and design managers fail to identify their concrete tasks with the offers of design science.“ (ANDREASEN 1987, S. 171) Die Konstruktionswissenschaft berücksichtige zudem nicht, dass 90% der Konstruktionstätigkeiten Routinetätigkeiten seien und dass entscheidende Erfolgsfaktoren für Entwicklungsprojekte häufig nicht durch standardisierte Abläufe erreicht werden, sondern gerade durch Abweichungen davon. „Any development project contains a few special features, properties, parameters or conditions that are central for the success of the result, and these elements differ from project to project.“ (ANDREASEN 1987, S. 172) Auch sei ganzheitliches im Gegensatz zu sequentiellem Denken in der Konstruktionsmethodik unterrepräsentiert, das Zusammenwirken zwischen verschiedenen Fachkompetenzen und Disziplinen, die Ausbalancierung von Zielkonflikten zwischen Markt, Produkt und Produktion werde vernachlässigt und auch unterschiedliche Managementkonzepte für die Kooperation während der Produktentwicklung würden nicht genügend beachtet.

GILL 1990 beklagt die mangelnde Kohärenz der Begriffe der Konstruktionswissenschaft und einen Mangel an Übereinstimmung in zentralen Konzepten, die eine Übernahme in die Praxis verhinderten.

PAHL 1990 reagiert auf eine Reihe von Kritikpunkten gegenüber der Konstruktionsmethodik und weist diese unter Anführung von Fallbeispielen überwiegend zurück. Die mangelnde Eignung der Konstruktionsmethodik für Anpassungs- und Variantenkonstruktionen räumt er zwar ein, aber insbesondere der Vorwurf der mangelnden Flexibilität und der Behinderung von Kreativität sei auf eine falsche Interpretation der Vorgehenspläne der Konstruktionsmethodik zurückzuführen. „Konstruktionsmethodik ersetzt nie Kreativität oder Motivation. Konstruktionsmethodik ist ein Leitfaden, eine Hilfe und eine Denkschulung, die sich im Unterbewusstsein manifestieren soll, damit sich Denk- und Handlungsstrukturen bilden, die es gestatten, intuitiv im Sinne eines geordneten konstruktionsmethodischen Vorgehens zweckmäßig zu handeln.“ (PAHL 1990, S. 29) Die mangelnde Umsetzung in der Praxis sei in vielen Fällen auch administrativ begründet und deshalb auch auf diesem Wege zu beheben. „Konstruktionsmethodik als Ganzes oder in partieller Anwendung kann nur erfolgreich umgesetzt werden, wenn die vorgesetzten Führungskräfte diese kennen, verstanden haben und von ihren Mitarbeitern eine entsprechende Arbeitsweise abverlangen.“ (PAHL 1990, S. 29) Die Konstruktionsmethodik

sei allerdings in Einzelbereichen „ergänzungs- und korrekturbedürftig“: „Grenzen der Konstruktionsmethodik liegen darin, dass sie individuelle Kreativität und Fachwissen nicht ersetzen kann. Den eigentlichen Denkprozess haben wir noch nicht richtig verstanden.“ (PAHL 1990, S. 30)

MÜLLER 1991 wendet sich „Akzeptanzbarrieren“ zu, die einen Einsatz der Konstruktionsmethodik in der Praxis behindern und verweist darauf, dass diese „nicht immer nur böser Wille, Denkträgheit oder alter Zopf“ (MÜLLER 1991, S. 769) seien, sondern durchaus legitim. „Methoden organisieren, ebenso wie Programmpakete, rational gesteuerte Prozesse intelligenter Arbeit. Sofern sie nicht wohlüberlegt darauf ausgelegt sind, die Erfahrungssphäre des Fachmannes einzubeziehen, schränken sie den für kreative Problemlöser notwendigen Orientierungsfreiraum drastisch ein. In Akzeptanzbarrieren tritt also Notwehr in Erscheinung.“ (MÜLLER 1991, S. 769) Aus eigener Anschauung berichtet er von Abwehrreaktionen schon beim Versuch der begleitenden methodischen Betreuung von Konstrukteuren in der Praxis, die „[...] dann begrüßt wurde, wenn ein Berater in Notsituationen zur Verfügung stand. Zielen wir auf durchgängige Beratung oder auf methodische Arbeitsplanung in der Startphase ab, begegneten wir Vorbehalten umso intensiver, je korrekter und geschlossener wir dabei vorgehen wollten.“ (MÜLLER 1991, S. 770, Hervorhebung im Original) Er wendet sich gegen die Vorstellung, „[...] ein Problemlöser sei nur dann am effektivsten und erfolgreichsten, wenn er rational geplant in explizit verwalteten Faktenbeständen arbeitet. Diese Verabsolutierung ist falsch. Sie entspricht nicht der menschlichen Natur. Methodische Lehren dürfen sich daran nicht orientieren. Der Mensch ist kein computergesteuerter Roboter!“ (MÜLLER 1991, S. 772f., Hervorhebungen im Original) Es sei vielmehr davon auszugehen, dass ein solches rationales Vorgehen nur im „Notfallbetrieb“ auftritt, „wenn [...] im Prozess die Informations-not dominant ist – weil ein sehr komplexes bzw. intransparentes Problem ansteht [...]“. (MÜLLER 1991, S. 771, Hervorhebung im Original). Im „Normalbetrieb“ werde dagegen aufbauend auf Erfahrungswissen „[...] ‚schweigend‘, nicht-bewusstseinspflichtig in stereotyp verfügbaren Prozeduren und Beständen, aufwandsarm intensiv gearbeitet [...]“. (MÜLLER 1991, S. 771) Dieses Vorgehen verlaufe „[...] messbar schneller als im rational geplanten und gesteuerten Notfallbetrieb [...]“ und sei deshalb „[...] – sofern das je anstehende Problem damit tatsächlich beherrscht wird – für den Problemlöser effizienter.“ (MÜLLER 1991, S. 772)

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass es zahlreiche Einwände gegen und Kritikpunkte am präskriptiven konstruktionsmethodischen Konzept gibt:

- Die Konstruktionswissenschaft sei insgesamt empirisch nicht fundiert, d.h. erfasse die konkreten empirischen Realitäten ihres Betrachtungsgegenstands nicht.
- Die Zerlegung von Konstruktionsproblemen in elementare Teilprobleme, aus denen sich deduktiv bzw. algorithmisch über mehrere Konkretisierungsstufen konkrete Lösungen erzeugen lassen, sei für „echte“ Konstruktionsprobleme unterkomplex. Das Ganze sei eben mehr als die Summe seiner Teile.

- Die Ausgangsinformation am Beginn eines Konstruktionsprozesses könne unmöglich die zur Problemlösung notwendige Information vollständig enthalten, was im Informationsverarbeitungsmodell jedoch vorausgesetzt werde. Die Problemlösung sei im Gegenteil notwendig an die Lösungskonkretisierung gebunden.
- Phasenmodelle und Ablaufschemata seien zu linear und berücksichtigten Iterationen, die in jedem Falle unvermeidbar seien, nicht oder nicht ausreichend.
- Der Fokus der Vorgehensvorschläge und Methodenangebote läge auf Neukonstruktionen und vernachlässige Anpassungs- und Variantenkonstruktionen, die in der Praxis den weit größeren Anteil ausmachten.
- Organisatorische Aspekte wie die Einbindung der Produktentwicklung in Unternehmensaufbau und –abläufe, die Berücksichtigung von Unternehmenszielen und –strategien oder die konkreten Kooperationsformen in Entwicklungsabteilungen und Entwicklungsteams hätten keinen Eingang in konstruktionsmethodische Strategien und Handlungsempfehlungen gefunden.
- Erkenntnisse der Kognitionspsychologie über individuelle Denk- und Handlungsformen beim Entwickeln und Konstruieren spiegelten sich in „technizistisch verengten“ Modellvorstellungen vom kognitiven Problemlösen nicht wider. Insbesondere würden diskursiv-rationale Denkformen und Problemlösestrategien gegenüber kognitiv aufwandsärmeren, erfahrungsbasierten und eher intuitiven überbewertet. Kreativität und Intuition würden so behindert.
- Konstruktionsmethodische Handlungsempfehlungen seien insgesamt „heuristisch schwach“, d.h. lieferten weder bessere Ergebnisse noch verringerten sie den Konstruktions- und Entwicklungsaufwand.

Obwohl diese Kritik selbst in den meisten Fällen nicht valide empirisch belegt ist, sondern überwiegend auf Einzelbeobachtungen und individuellen Erfahrungen beruht, muss man doch feststellen, dass die – nicht zuletzt von dieser Kritik motivierte – empirische Konstruktionsforschung in den letzten Jahren Befunde zusammengetragen hat, die viele dieser Einschätzungen stützen (ausführlich hierzu Kapitel 3). Auch diese Arbeit versucht, einige der durch diese Kritik aufgeworfenen Fragen zu beantworten.

2.3 Kognitionspsychologische Grundlagen des Konstruierens

Wesentliche Grundlage für die Entwicklung der Konstruktionsmethodik war das Verständnis des Konstruierens – zunächst rein kybernetisch inspiriert – als „Informationsverarbeitung“ (vgl. Kapitel 2.1, vor allem RODENACKER 1970, VDI 2222 (1973), HUBKA 1976 und PAHL & BEITZ 1977) später dann zunehmend denkpsychologisch begründet als komplexes oder heuristisches Problemlösen (vgl. z.B. PAHL 1985, EHRENSPIEL 1995, PAHL & BEITZ 1997), für das sich der Terminus „Design Problem Solving“ durchgesetzt hat. Die Konstruktionsforschung vollzog damit einen Paradigmenwechsel der kognitiven Psychologie nach. Dort nahm die Problemlöseforschung seit den 1950’er Jahren einen starken Aufschwung, nachdem vor allem von BROADBENT 1958 und NEWELL & SIMON

1958⁷ Modellvorstellungen eingeführt wurden, die – ebenfalls durch Entwicklungen in der Computertechnologie und Kybernetik inspiriert – kognitive Problemlöseprozesse von Menschen als Informationsverarbeitung interpretierten. Dieses Konzept eröffnete einen prinzipiell neuen Zugang zur Erforschung kognitiver Prozesse. „Ein Meilenstein für die Entwicklung des Paradigmas der Informationsverarbeitung waren Überlegungen von NEWELL & SIMON 1972, die menschliche Geistestätigkeit als *symbolverarbeitende Prozesse bzw. Systeme* zu verstehen.“ (LUER & SPADA 1992, S. 194, Hervorhebungen im Original) Im deutschsprachigen Raum wurde dieses Konzept vor allem von Dörner (DÖRNER 1974, DÖRNER 1976, DÖRNER ET AL. 1983, DÖRNER 1989) eingeführt und erweitert.

Problemlösen wird als *zielgerichtete Verarbeitung prozeduralen Wissens* interpretiert, bei dem ein Ziel nicht direkt erreicht werden kann, sondern nur über die Bildung von Teilzielen. Dabei ist die Anwendung von *Operatoren*, d.h. Handlungen, die die Ausgangssituation in Richtung auf das angestrebte Ziel verändern, notwendig (vgl. ANDERSON 2001, S. 242ff.). Im Modell von Newell & Simon, werden die elementaren Prozesse kognitiven Problemlösens als „Information Processing System“ (IPS) aufgefasst, das u.a. aus den folgenden Elementen besteht (NEWELL & SIMON 1972, S. 19ff.):

1. einem Satz von *Symbolen*;
2. einer *Symbolstruktur*, d.h. Regeln für die Verknüpfung von Symbolen;
3. einem *Gedächtnis*, d.h. einem Speicher für Symbole und Symbolstrukturen;
4. einem *Informationsprozess*, der aus Operationen und Prozessen besteht, die auf Symbolen und Symbolstrukturen operieren;
5. einem *Prozessor* für die Verarbeitung von Symbolstrukturen, der *elementare Informationsprozesse* enthält;
6. einem weiteren *Kurzzeitspeicher* bzw. einem *Kurzzeitgedächtnis* und einem *Interpreter*, der die Anwendung elementarer Informationsprozesse steuert.

Zusammen mit *Rezeptoren* und *Effektoren* für die Interaktion und Kommunikation mit der externen *Problemumwelt* entsteht ein geschlossenes Modell (Abbildung 2-20).

⁷ Bei NEWELL & SIMON 1958 erhält man einen besonderen Eindruck von der damaligen Euphorie, die mit der Computertechnologie und dem Informationsverarbeitungsmodell verbunden war. Sie prognostizierten z.B., dass innerhalb eines Jahrzehnts Computer praktisch sämtliche intellektuelle Leistungsmerkmale des Menschen aufweisen oder sogar übertreffen würden.

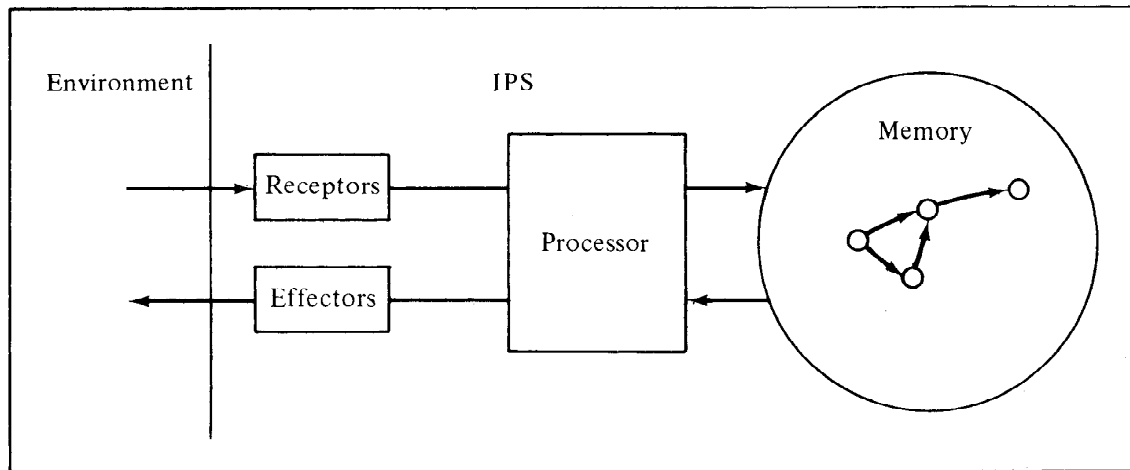


Abbildung 2-20: Denken und Problemlösen als Information Processing System (IPS) (NEWELL & SIMON 1972, S. 20)

In neueren Modellen wird die Theorie des Kurzzeitgedächtnisses – die z.T. experimentellen Befunden widerspricht – zugunsten eines Gedächtnismodells, das mit nur einem Speicher auskommt, in dem Informationen auf verschiedenen Ebenen kodiert und verarbeitet werden, aufgegeben. Die hohe Verlustrate von Informationen bei nur kurzfristiger Memorierung ist in diesen Modellen nunmehr Ergebnis einer nur temporären *Aktivierung* von Informationselementen im (Langzeit-)Gedächtnis (vgl. z.B. das ACT-Modell von ANDERSON 1983). Interessant im Zusammenhang mit dem Entwurfshandeln ist eine Erweiterung dieses Modells durch BADDELEY 1986, der in seiner Theorie des Arbeitsgedächtnisses einen *artikulatorischen* und einen *räumlich-visuellen* Verarbeitungsprozess unterscheidet, die beide von einer *zentralen Exekutive* koordiniert werden (Abbildung 2-21).

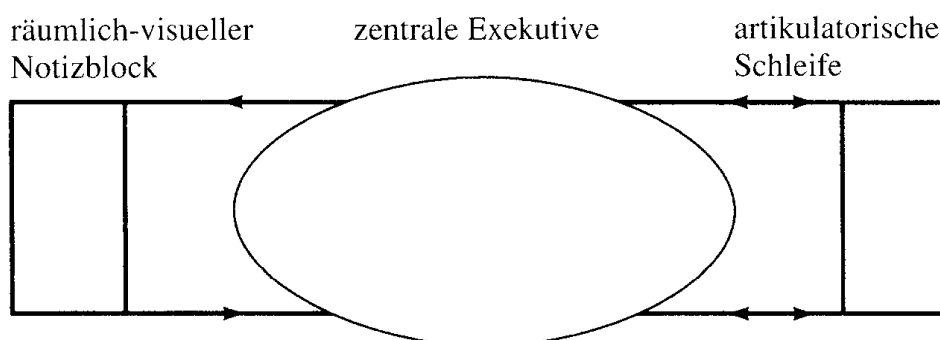


Abbildung 2-21: Verfügbarhaltung von Information im Arbeitsgedächtnis (BADDELEY 1986, zit. nach ANDERSON 2001, S. 180)

Baddeley spricht im Original von einem „visuospatial sketchpad“, einem *räumlich-visuellen Skizzenblock* also, was darauf verweist, dass das *externe* Skizzieren und Modellieren – also das räumlich-visuelle Darstellen, das beim Entwurfshandeln von besonderer Bedeutung ist – eine direkte, die mentale Verarbeitungskapazität beträchtlich erhöhende, *interne* Entsprechung beim elementaren Handhaben von Gedächtnisinhalten hat. Empirische Befunde, die bei der Untersuchung des Nutzens aufwandsarmer

Modellierung beim Konstruieren gewonnen wurden (SACHSE 1999, PACHE ET AL. 2001, RÖMER ET AL. 2001, RÖMER 2002), korrelieren mit diesem Konzept. In diesen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass „[...] Skizzen neben der Gedächtnisentlastung auch eine Denkhilfe bieten, dass sie also das Generieren und Weiterentwickeln von Lösungskonzepten unterstützen. [...] Eine Analyse [...] zeigte ferner, dass in den Skizzen sprachlich-begriffliche, symbolhaft-abstrakte sowie bildhaft-anschauliche Informationen kombiniert wurden.“ (RÖMER 2002, S. 130f.) Dabei ist zu beobachten, „[...] dass mit wachsender Erfahrung der Einsatz abstrakter, funktionaler Zusammenhänge zu Gunsten bildlicher Erfahrung sinkt.“ (GÖKER 1996, S. 52)

Auch das Konzept der „Multimodalität“ des Gedächtnisses – d.h. des ständigen Wechsels zwischen bildlichen und begrifflichen Repräsentationen von Gedächtnisinhalten – als Basiskomponente kreativen Denkens ist mit diesem Ansatz stark verwandt und durch eine Reihe empirischer Befunde für den Bereich des Entwurfshandelns belegt (vgl. z.B. GÖKER 1996, HÖHNE ET AL. 1997, KRAUSE ET AL. 1999). „Prozessanalytisch spielt der Modalitätswechsel unter dem Aspekt der Aufwandsreduktion eine besondere Rolle. Bilder sind [...] leichter zu behalten als Begriffe, dafür weniger flexibel beim Denken [...]. Begriffe zeigen eine höhere Flexibilität beim Denken [...], sind aber schwerer zu behalten als Bilder.“ (KRAUSE ET AL. 1997, S. 4)

2.3.1 Konstruieren als Problemlösen: Design Problem Solving

Die Interpretation elementarer Denkprozesse als Informationsverarbeitung ist zunächst anwendbar auf verschiedene Gegenstandsbereiche menschlichen Denkens. Im Zusammenhang dieser Arbeit steht jedoch das *Lösen von Problemen* im Vordergrund. Die Kognitionspsychologie definiert Probleme als eine subjektiv empfundene Differenz zwischen einem aktuellen inneren oder äußeren Zustand und einem wünschenswerten Zielzustand. „A person is confronted with a *problem* when he wants something and does not know immediately what series of actions he can perform to get it.“ (NEWELL & SIMON 1972, S. 72, Hervorhebung im Original) Unterschieden wird dabei zwischen *Aufgaben*, die durch einfache Anwendung bekannter Transformationsregeln bzw. Operationen gelöst werden können und *Problemen*, bei denen eine direkte Lösung aus irgendeinem Grund behindert ist. Ein weiteres zentrales Konzept in diesem Modell ist der *Problemraum*, in dem die Problemumwelt subjektiv abgebildet wird und in dem nach Lösungen für das Problem gesucht wird (vgl. NEWELL & SIMON 1972, S. 810). „Ein Problem liegt dann vor, wenn ein Subjekt an der Aufgabenumwelt Eigenschaften wahrgenommen hat, sie in einem Problemraum intern repräsentiert und dabei erkennt, dass dieses innere Abbild eine oder mehrere unbefriedigende Lücken enthält. Der Problemlöser erlebt eine *Barriere*, die sich zwischen dem ihm bekannten Istzustand und dem angestrebten Ziel befindet.“ (LUER & SPADA 1992, S. 256, Hervorhebung im Original)

Newell und Simon unterscheiden dabei *wohlstrukturierte* („well-structured“) und *schwach strukturierte* („ill-structured“) Probleme. Wohlstrukturierte Probleme werden dabei vor allem durch hohe Einsicht in Ausgangs- und Zielbedingungen charakterisiert sowie durch eine rein formal-algorithmische Lösbarkeit, schwach strukturierte durch das Gegenteil,

also einen Mangel an entsprechenden Informationen. „In short, well-structured problems are those that can be formulated explicitly and quantitatively, and that can then be solved by known and feasible computational techniques. [...] Problems are ill-structured when they are not well-structured.“ (NEWELL & SIMON 1958, S. 5, vgl. auch NEWELL & SIMON 1972, S. 73; SIMON 1973). Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Reitman (REITMAN 1964, REITMAN 1965) und führt die Begriffe *wohldefiniert* („well-defined“) und *schwach definiert* („ill-defined“) ein. Der Hauptunterschied zwischen diesen Kategorien besteht darin, dass wohldefinierte Probleme eher formaler, schwach definierte Probleme eher empirischer Natur seien. „Certainly it is true that only a formal system can *guarantee* absolute indifference to all but a specified set of sources of variance; and even this guarantee refers only to the formalisms, not to their empirical realizations.“ (REITMAN 1964, S. 300, Hervorhebung im Original) Probleme können in einem Kontinuum zwischen diesen beiden Extremen angesiedelt sein, wobei der Grad der Schwach- oder Wohldefiniiertheit von der *Eindeutigkeit* der einschränkenden Randbedingungen („constraints“) abhängt. „[...] to the extent that a problem situation evokes a high level agreement over a specified community of problem solvers regarding the referents of the attributes in which it is given, the operations that are permitted, and the consequences of those operations, it may be termed unambiguous or well defined with respect to that community. [...] it is the open constraints that are the locus and the source of this ambiguity, interindividual variability, and problem ill definedness.“ (REITMAN 1964, S.301) Reitman wirft zudem die interessante Frage auf, wann ein schwach definiertes Problem eigentlich als gelöst angesehen werden kann, wenn definitionsgemäß ein eindeutiges Kriterium bzw. ein eindeutiger Test für die Überprüfung einer Lösung fehlen. Seiner Auffassung nach ist diese Frage nach der Lösung eines schwach definierten Problems die Frage nach der *Akzeptanz* bzw. *Akzeptierbarkeit* einer vorgeschlagenen Lösung (vgl. REITMAN 1964, S. 302f.), verweist also auf relative und subjektive Kriterien, die ggf. organisational – d.h. im Wege aushandelnder Kommunikation – festgelegt werden müssen. Dieser gerade für die Produktentwicklungspraxis offenkundig charakteristische Zusammenhang wird von vielen späteren Autoren, die eine wenn schon nicht eindeutige, so doch objektive Überprüfung der Lösung eines Problems in ihren Betrachtungen – implizit oder explizit – voraussetzen, vernachlässigt.

Dörner bevorzugt anstelle von *wohldefiniert* und *schwach definiert* die begriffliche Dichotomie von *geschlossen* und *offen* und entwickelt ausgehend vom Konzept der lösungsbehindernden Barriere eine Klassifizierung von Problemen. „Die Frage nach den Typen von Problemen [...] ist die Frage nach den Typen von Barrieren, die die Transformation des Anfangszustandes in den Endzustand verhindern.“ (DÖRNER 1976, S. 11). Dabei betrifft eine Klasse von Barrieren – bzw. „Lücken“ im Problemraum – die Verfügbarkeit von Mitteln bzw. Operatoren um den Endzustand zu erreichen, eine andere die Verfügbarkeit von Informationen über den Ausgangszustand und den gewünschten Endzustand (Abbildung 2-22).

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

Abbildung 2-22: Klassifikation von Barrieretypen in Problemen (DÖRNER 1976, S. 14)

Bei *Interpolationsproblemen* sind die Zielkriterien bekannt und klar definiert, und auch die notwendigen Mittel, um das Ziel zu erreichen. So muss „nur“ die richtige Kombination von Mitteln gefunden werden, um das Problem zu lösen. Dass solche Probleme durchaus nicht trivial sein müssen, wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass das Schachspiel überwiegend ein Interpolationsproblem darstellt. *Syntheseprobleme* bestehen dann, wenn Ausgangsbedingungen und Ziel genau bekannt sind, die notwendigen Mittel zur Zielerreichung jedoch noch gefunden bzw. entwickelt werden müssen. *Dialektische Probleme* zeichnen sich dadurch aus, dass Ausgangsbedingungen und Ziel nur unscharf definiert sind, die potenziellen Mittel zur Lösung des Problems jedoch bekannt sind. Solche Probleme erfordern zu ihrer Lösung die Analyse und Klärung von Ausgangsbedingungen und Zielkriterien, so dass man sich dann schrittweise einem Interpolationsproblem nähert. Sind die Informationen über Ausgangsbedingungen und Ziel unscharf und zudem potenzielle Mittel zur Problemlösung unbekannt, stößt man gleichzeitig auf eine dialektische und eine Synthesebarriere. RÖMER 2002 ordnet dieser Problemmklassifikation typische Konstruktionsprobleme zu (Abbildung 2-23).

		Konstruktionsproblem Vollständigkeit und Klarheit der Anforderungen und Bedingungen	
		hoch	gering
Konstrukteur Anwendbarkeit von bekannten Vorgehensweisen und Hilfsmitteln	hoch	Interpolationsproblem <i>einfache</i> <i>Variantenkonstruktion</i> z.B. Konstruktion nach vorgegebenem Muster	Dialektisches Problem <i>einfache</i> <i>Entwicklungsstudie</i> z.B. können Anforderungen für das Produkt nicht ermittelt werden
	gering	Syntheseproblem <i>komplexe</i> <i>Anpassungskonstruktion</i> z.B. Konstruktion bei sich widersprechenden Zielen und zu engen Lösungsfreiräumen	Synthetisches und dialektisches Problem <i>Neukonstruktion</i> z.B. sind die Anforderungen und Lösungswege unklar

Abbildung 2-23: Klassifikation von Konstruktionsproblemen (RÖMER 2002, S. 18)

RITTEL & WEBBER 1973 wenden ein, dass das Informationsverarbeitungsmodell auf Planungsprobleme – als die komplexe Entwurfsprobleme weitgehend auch angesehen werden können – nur begrenzt anwendbar sei, da diese „vertrackt“ („wicked“) seien, indem sie (selbstreferentiell) auf sich selbst verweisen. „The information needed to *understand* the problem depends upon one’s idea for *solving* it. That is to say: in order to *describe* a wicked problem in sufficient detail, one has to develop an exhaustive inventory of all conceivable *solutions* ahead of time.“ (RITTEL & WEBBER 1973, S. 136) Die (Um)Formulierung eines solchen „wicked“ Problems in einer Weise, die es der Beschreibung und Bearbeitung durch das Informationsverarbeitungsmodell zugänglich macht – im Sinne Reitmans die Transformation einer empirischen in eine formale Problemrepräsentation –, sei schon der wesentliche Teil der Lösung des Problems. „[...] setting up and constraining the solution space and constructing the measure of performance is the wicked part of the problem. Very likely it is more essential than the remaining steps of searching for a solution which is optimal relative to the measure of performance and constraint system.“ (RITTEL & WEBBER 1973, S. 138) *Wicked Problems* seien unter anderem dadurch charakterisiert,

- dass sie nicht eindeutig formuliert werden können;

- dass sie nicht vollständig bzw. endgültig gelöst werden können;
- dass Lösungen nicht objektiv *richtig* oder *falsch* sondern lediglich subjektiv *gut* oder *schlecht* sein können, so dass es auch kein eindeutiges Testverfahren für die Lösung geben kann;
- dass das Lösungsrisiko hoch ist, da die Auswirkungen bzw. Kosten schlechter Lösungen irreparabel bzw. inakzeptabel sein können;
- dass die Menge denkbarer Lösungen und möglicher Mittel und Wege, diese zu erreichen, potenziell unendlich groß ist.

GOEL & PIROLI 1992 übertragen dieses Konzept auf Entwurfsprobleme und legen empirische Befunde vor, die die Übertragbarkeit belegen. In enger Anlehnung an RITTEL & WEBBER 1973 definieren sie eine aus zwölf *invarianten Merkmalen* bestehende Problemtaxonomie für Entwurfsprobleme (GOEL & PIROLI 1992, S. 405f.).

Auch Dörner schlägt vor, die *objektiven* Sachverhalte innerhalb des *Realitätsbereiches* eines Problems entlang der Dimensionen *Komplexität, Dynamik, Vernetztheit, Transparenz*, und *Grad des Vorhandenseins freier Komponenten* genauer zu klassifizieren. Rückert und Schroda (RÜCKERT ET AL. 1997A, SCHRODA 2000) haben aufbauend auf diesem Konzept eine Problemtaxonomie für Konstruktionsaufträge entwickelt, die die Dimensionen

- widersprüchliche Ziele,
- Komplexität,
- Intransparenz,
- Freiheitsgrade,
- Dynamik und
- erforderliches Wissen

umfasst. Diese Problemtaxonomie wurde in einem Verfahren zur Beurteilung der Anforderungshöhe von Konstruktionsaufträgen operationalisiert, das sich inzwischen mehrfach empirisch bewährt hat (vgl. SCHRODA 2000, BENDER 2003) und auch in dieser Arbeit zur Beurteilung und Standardisierung der Anforderungshöhe von Konstruktionsaufträgen eingesetzt wurde (vgl. Kapitel 4.1.4.3).

2.3.2 Strategien zur Lösung von Problemen

Um Probleme zu lösen, müssen Lücken im Problemraum geschlossen und lösungshindernde Barrieren überwunden werden. Man spricht hier auch von einer Suche im Problemraum (LUER & SPADA 1992, S. 262ff., ANDERSON 2001, S. 243ff.).

Prinzipiell stehen für die Bewältigung solcher Denkaufgaben das Lösen mit einfachen Lösungsalgorithmen, das deduktive – d.h. schlussfolgernde – und das induktive – d.h. Hypothesen bildende und überprüfende – Denken sowie heuristische Strategien zur Verfügung (vgl. LUER & SPADA 1992, S. 195ff.). Beim algorithmischen Bearbeiten werden

feststehende Regeln bzw. Operationen eingesetzt, die als prozedurales Wissen ins Arbeitsgedächtnis gerufen werden und eine eindeutige Lösung direkt herbeiführen. Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen eines „lückenlosen Problemraums“ – das Problem wird zur Aufgabe.

Beim deduktiven Denken werden ausgehend von Prämissen Schlussfolgerungen gezogen. „Deduktives Denken dient der gezielten *Wissenserweiterung* durch eine aktive Verarbeitung gegebener Kenntnisse mit Hilfe von Inferenzen⁸. Deduktiv über gültige Schlussfolgerungen erarbeitetes Wissen ist sicheres Wissen.“ (LUER & SPADA 1992, S. 220, Hervorhebung im Original) Man unterscheidet *konditionales* bzw. *bedingtes* Schließen, bei dem Schlussfolgerungen in der „Wenn-Dann Form“ – vorwärts oder rückwärts – durch Implikationen miteinander verbunden sind und *kategorische Syllogismen*, bei denen aus – mindestens – zwei Prämissen ein Schluss gezogen wird, so dass eine Gruppe von – mindestens – drei Aussagen entsteht, die untereinander widerspruchsfrei sein müssen, um eine gültige Schlussfolgerung zu erhalten. Diese Denkformen sind Grundlage des logischen Denkens.

⁸ Inferenz = „Überbrückungsschluss (bridging inference): Eine Schlussfolgerung, die notwendig ist, um zwei Teile eines Textes miteinander zu verbinden.“ (ANDERSON 2001, S. 475)

Beim induktiven Denken werden aus empirischen Erfahrungen Verallgemeinerungen abgeleitet. „*Induktives Denken führt somit zu Hypothesen. Es beinhaltet ihre Bildung und Überprüfung, gegebenenfalls auch Revision im Lichte neuer Information. Induktives Denken ist konstruktiv und interaktiv.*“ (LUER & SPADA 1992, S. 236, Hervorhebungen im Original) Induktive Verallgemeinerungen führen im Gegensatz zu deduktiven Schlüssen nicht auf objektiv gesichertes Wissen. „[...] eine *induktiv gewonnene Aussage* [ist] nur mehr oder weniger *wahrscheinlich*, auch wenn die Prämissen wahr sind und die Inferenz korrekt durchgeführt wird. *Induktives Denken ist prinzipiell mit Unsicherheit behaftet.*“ (LUER & SPADA 1992, S. 236, Hervorhebungen im Original) Induktives Denken ist wesentlich Grundlage für heuristische Strategien der Problemlösung. „*Heuristische Strategien* sind Lösungsmethoden, deren Anwendung nicht sicher zu Lösungen führen muss, die jedoch die Lösungsfindung häufig erleichtern.“ (LUER & SPADA 1992, S. 265, Hervorhebungen im Original) Für die Lösung komplexer, d.h. schwach definierter Probleme mit hohen Anforderungen an das für die Problemlösung benötigte Wissen – wie sie Entwurfsprobleme aus frühen Phasen regelmäßig darstellen – kommen nur heuristische Strategien in Frage. Wesentliches Ziel solcher Strategien ist es, ein vollständiges Absuchen des Problemraums – d.h. das Finden und Überprüfen *aller* möglichen Lösungen – zu vermeiden, weil dies entweder prinzipiell unmöglich ist oder weil der Aufwand zu hoch wäre. Dabei kommt es darauf an, eine angemessene Einschränkung oder Erweiterung des Problemraumes vorzunehmen und gleichzeitig Unklarheiten im Hinblick auf die Zielformulierung zu verringern. Hierfür wird in der Literatur (vgl. z.B. NEWELL 1970, NILSSON 1971, NEWELL 1980, STAUFFER & ULLMAN 1991) eine Vielzahl von Vorschlägen unterbreitet, die insbesondere in Bezug auf das Lösen komplexer Entwurfsprobleme bedeutsam sind. Einige Beispiele:

- *obvious solution first*, d.h. Auswahl einer offenkundig geeigneten (Teil-)Lösung und anschließende Überprüfung;
- *divide and conquer*, d.h. die Zerlegung des Problems in lösbare Teilprobleme und anschließende Integration zu einer Gesamtlösung;
- *pre-compiled solution*, d.h. Rückgriff auf und Anpassung von früheren Lösungen;
- *most-constrained first*, d.h. Konzentration auf die am stärksten äußeren Einschränkungen unterliegenden Problemaspekte;
- *generate and test*, d.h. orientierendes Probieren und Überprüfen;
- *means-end-analysis (Mittel-Ziel-Analyse)*, d.h. Suche nach neuen (Teil-)Zielen, auf die bekannte Lösungsmittel anwendbar sind;
- *hill-climbing*, d.h. schrittweise Unterschiedsreduktion zwischen Ausgangs- und Endzustand (vgl. auch das TOTE-Schema von MILLER ET AL. 1960, das z.B. im Ansatz von PAHL und BEITZ zur Anwendung kommt (PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 61))
- *pattern-matching*, d.h. die Erkennung von Mustern, die eine Anpassung und Übertragung bekannter Problemlösemittel zulässt.

Diese Strategien sind oft nicht sauber voneinander zu trennen sondern überschneiden sich vielfach. Alle zielen jedoch darauf, die Problemstellung schrittweise von einem schwach definierten in einen besser definierten Zustand zu überführen, der dann – für das ganze Problem oder zunächst nur für Teile – einer regelbasierten Bearbeitung zugänglich wird. *Komplexitätsreduktion* im Sinne des Schließens von Lücken im Problemraum kann deshalb als gemeinsames Merkmal aller heuristischen Problemlösestrategien festgehalten werden. Zudem basieren heuristische Strategien überwiegend auf induktivem Denken, sind also Hypothesen bildend und testend.

Komplexitätsreduktion ist wesentliche Voraussetzung für die Verminderung des mentalen Bearbeitungsaufwandes, weil sie dafür sorgt, dass die im Gedächtnis zur Bearbeitung nötige aktivierte Informationsmenge reduziert wird (vgl. z.B. HACKER 1989, HACKER 1999). Das Bestreben, den mentalen Bearbeitungsaufwand zu verringern, d.h. das *Prinzip der kognitiven Ökonomie*, ist kennzeichnend für (erfolgreiche) menschliche Problemlöser. Dieses gilt insbesondere für konstruktive Entwicklungsprozesse, wie empirisch vielfach nachgewiesen wurde (vgl. Kapitel 3.1). Wie von einigen Autoren kritisiert wird (vgl. Kapitel 2.2), fokussieren präskriptive Modelle des Entwurfshandelns z.T. stark auf algorithmische und deduktive Problembearbeitung und vernachlässigen damit dieses Prinzip – z.T. durchaus bewusst, um unvermeidlichen Schwächen induktiver und heuristischer Strategien zu begegnen: ihrer Unvollständigkeit und mangelnden Aussagegesicherheit.

2.3.3 Kann man Konstruieren lernen? Der Erwerb von Expertenwissen und Expertenkönnen

Die Fähigkeit, komplexe Probleme zu lösen, muss gelernt werden. Es handelt sich hierbei um spezielle Kenntnisse und Fähigkeiten, die zu den herausragenden Kompetenzen von Menschen gehören und die entsprechend komplexe Lernprozesse voraussetzen. Die Psychologie unterscheidet beim Erlernen solch spezieller Kompetenzen drei Phasen (vgl. ANDERSON 2001, S. 281ff.). In der *kognitiven Phase* wird eine *explizite* bzw. *deklarative* Repräsentation von Fakten und Regeln herausgebildet, so dass eine Menge von Problemlöseoperatoren zur Verfügung steht, mit der eine bestimmte Klasse von Problemen unter bewusster Regelanwendung gelöst werden kann. In der *assoziativen Phase* wird die Anwendung dieses deklarativen Wissens eingeübt, d.h. ständig korrigiert, verfeinert und internalisiert, so dass schrittweise deklaratives bzw. explizites Wissen durch *prozedurales – implizites –* Wissen ersetzt wird. Wenn auch in dieser Phase deklarative Wissensanteile weiter zur Problemlösung herangezogen werden, so ist es doch schon das prozedurale Wissen, das die Anwendung der Problemlöseoperatoren überwiegend steuert. In der *autonomen Phase* erfolgt die Problemlösung automatisiert und prozeduralisiert, d.h. mit nur geringem Einsatz von Aufmerksamkeitsressourcen.

Dieses Modell des Lernprozesses als anfangs bewusst-deklarative Aneignung von Wissen, Regeln und Verhaltensweisen mit darauf folgender schrittweiser Prozeduralisierung bis hin zur ggf. vollständigen kognitiven Automatisierung ist idealisiert. Tatsächlich kann die Regelaneignung und -anwendung explizit und aussagbar, aber auch implizit und

nicht aussagbar erfolgen. Explizit gelehrt komplexe Regelsysteme für das Problemlösen werden in der Regel zwar überwiegend aber nicht vollständig prozeduralisiert eingesetzt (vgl. z.B. HACKER 1989, HOFFMANN 1993, PERRIG 1990, PERRIG & PERRIG 1993, PERRIG 1996). Empirische Befunde legen nahe, dass gerade Expertenkompetenzen für das schöpferische Entwickeln und Konstruieren vielfach implizit, d.h. unbewusst und nicht aussagbar, erworben werden und auch retrospektiv explizite Regeln oft nicht angegeben werden können (vgl. z.B. HACKER 1989, HACKER 1992). Entscheidendes Merkmal ausgebildeter Expertenkompetenz ist, dass nicht nur konkrete Handlungsabfolgen, mit denen bestimmte Probleme gelöst werden können, *taktisch* gelernt werden, sondern dass darüber hinaus heuristische Kompetenzen *strategisch* gelernt werden. Heuristische Kompetenzen versetzen Experten in die Lage, die notwendige Organisation des Prozesses der Problemlösung selbst vorzunehmen, d.h. die notwendigen Anforderungs-, Randbedingungs-, und Zielklärungsprozesse sowie die Auswahl potenziell geeigneter Problemlöseoperatoren zu organisieren.

Eines der wichtigsten Ziele der Konstruktionsforschung der letzten Jahrzehnte war, diese hochkomplexen Kompetenzen bei Produktentwicklern in der Erstausbildung und der berufsbegleitenden Weiterbildung gezielt und reproduzierbar zu verankern. Hierfür setzte man auf eine initiale explizit-deklarative Vermittlung konstruktionstechnischen Fachwissens und konstruktionsmethodischer Vorgehensmodelle sowie auf einen systematischen Einsatz präskriptiver, explizit vermittelter Konstruktionsmethoden bei der Anwendung der so erworbenen Kompetenzen in der Berufspraxis. Während sich diese Form der *Regelvermittlung* an praktisch allen Hochschulen in Deutschland durchgesetzt hat, stößt die explizit-deklarative *Regelanwendung* auf Widerstände in der Berufspraxis (vgl. Kapitel 2.2). Man kann vermuten, dass der Zwang zur expliziten Regelanwendung die Effizienzgewinne der für hoch entwickeltes Expertenkönnen typischen Prozeduralisierung wieder aufhebt und deshalb nicht nur subjektiv als zu aufwändig empfunden wird, sondern auch objektiv zu aufwändig ist. Dieses ließe sich dadurch erklären, dass die bewusste und kontrollierte Anwendung von Vorgehensregeln mentale Verarbeitungskapazität in einem hohen Maße bindet, so dass Kapazitäten für die eigentliche Problembearbeitung fehlen (vgl. HACKER 1989, HACKER 1992). Gleichzeitig lässt sich für den Erwerb komplexer Problemlösekompetenzen jedoch beobachten, dass der explizite und bewusste Erwerb solcher Kompetenzen zwar bei der Bewältigung eines *ersten* Problems zunächst aufwändig sein kann, die Bewältigung ähnlicher *folgender* Probleme dagegen deutlich erleichtert. Es scheint, als würde eine Reflexion initialer Erfahrungen anhand abstrakter Regelsysteme die angestrebte Prozeduralisierung deutlich verbessern. Die „Investition“ in Form initialer expliziter Regelvermittlung zahlt sich somit womöglich erst später aus, kann sich also trotz anfänglich höheren kognitiven Aufwands langfristig lohnen (vgl. z.B. CORMIER & HAGMAN 1987, S. 3f.).

In der Praxis werden bei Experten zudem regelmäßig Mischstrategien beobachtet, bei denen explizite Regelanwendung mit der erfahrungsbasierten Anwendung bewährter und *konkreter* Lösungsmodule kombiniert wird. Dabei werden offenbar gleichzeitig sowohl Suchprozesse im Langzeitgedächtnis „abgekürzt“ als auch Verarbeitungskapazi-

täten für die kurzfristige Aktivierung und Bewussterhaltung von Informationen eingespart. Man spricht hier wegen des Rückgriffs auf nahe liegende Gelegenheiten („Opportunitäten“) auch von *opportunistischen* Strategien (vgl. auch Kapitel 3.1, insb. ULLMAN ET AL. 1988, GUINDON 1990, VISSER 1990, VISSER 1994). Man kann also vermuten, dass – gemessen an etablierten Modellen des Erwerbs von Expertenkompetenzen – den Lehrkonzepten der Konstruktionswissenschaft nach der Phase der expliziten *Regelvermittlung* die Flexibilität des *Regeleinsatzes*, die eine Prozeduralisierung und kognitiv aufwandsarme Anwendung erst ermöglicht, fehlt. Gestützt wird diese Hypothese durch empirische Befunde, die zeigen, dass Übungsgruppen, die nach expliziter Regelvermittlung in einer konstruktionsmethodischen Vorlesung in der Anwendung des so erworbenen Wissens einem strikten konstruktionsmethodischen Vorgehensplan folgen mussten, schlechtere Konstruktionsleistungen erbrachten als Gruppen, denen das konkrete Vorgehen und die Anwendung bestimmter Methoden freigestellt wurde. Auch der subjektiv empfundene Nutzen des Methodeneinsatzes war in den „selbstbestimmten“ Gruppen deutlich höher (RÜCKERT 1997, S. 126, S. 132; BENDER, (BEATE) 2001, S. 187ff.).

Es ist also insgesamt anzunehmen, dass weder eine reine explizit-deklarative Regelvermittlung, noch der rein intuitive, implizite Kompetenzerwerb den gewünschten Lernerfolg sicherstellen kann, sondern hier eine Mischstrategie vorteilhafter ist. Unklar ist jedoch, wie die beiden Enden dieses Spektrums konkret auszubalancieren sind.

KOLB 1984 geht in seinem Modell des *erfahrungsbasierten* Lernens davon aus, dass die „richtige“ Balance von explizitem und implizitem Lernen individuell verschieden ausgeprägt ist und von verschiedenen *Lernstilen* („learning styles“) abhängt, die sich entlang zweier Achsen zwischen den Attributen *Abstrakt* ↔ *Konkret* bzw. *Aktiv* ↔ *Reflexiv* einordnen lassen (KOLB 1984, S. 65ff.). Eine Vielzahl von Einflüssen führt auf eine je individuelle Schwerpunktsetzung, wobei in erfolgreichen Lernprozessen immer alle Elemente beteiligt sind. Kolb geht von einem zyklischen Lernmodell aus, bei dem aktives Experimentieren, konkrete Erfahrung, reflexive Beobachtung und abstrakte Konzeptbildung nacheinander schrittweise durchlaufen werden. Auf diese Weise gewonnene abstrakte Konzepte werden dann wiederum Ausgangspunkt und Gegenstand aktiven Experimentierens und so fort. Eine schrittweise Prozeduralisierung erfolgt also immer unter Beteiligung expliziter *und* impliziter Lernschritte sowie unter Verwendung abstrakter Konzepte *und* konkreter Gegenstände (Abbildung 2-24).

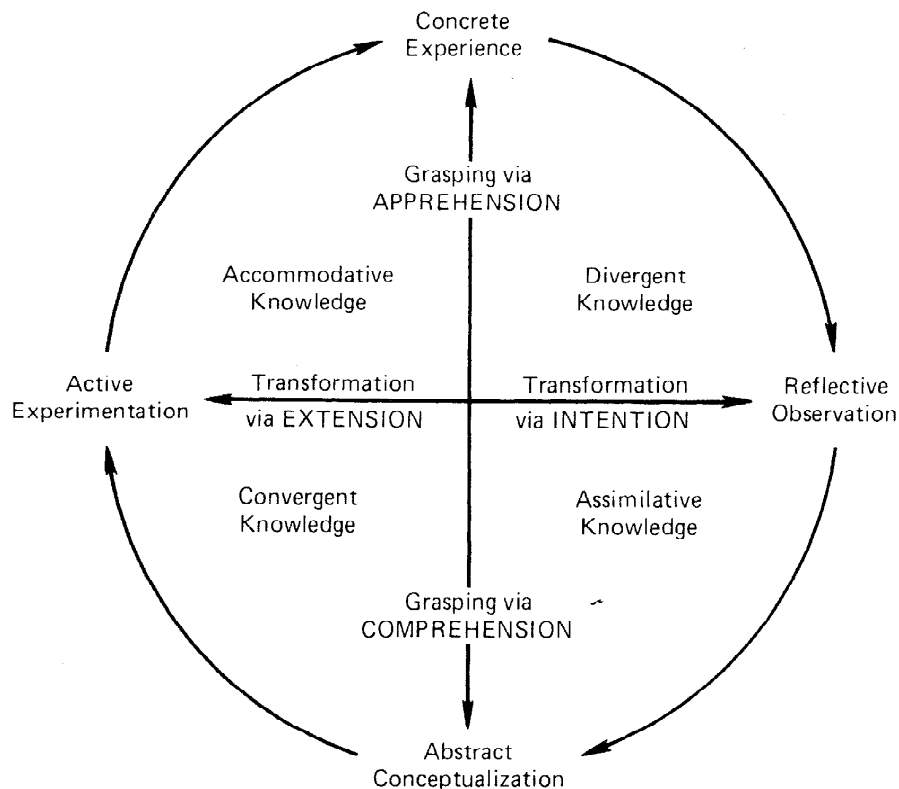


Abbildung 2-24: Kolbs Kreis des erfahrungsgeliteten Lernens (KOLB 1984, S. 42)

Entscheidend ist hier, dass je nach Lernstil und konkretem Lerngegenstand individuell unterschiedliche Startpunkte gewählt werden, ebenso unterschiedliche Betonungen der grundlegenden Lernschritte. Konkrete Erfahrung führt dabei eher zum *Begreifen* (Apprehension) des Problems, abstrakte Konzeptbildung eher zum *Verstehen* (Comprehension). Auf der anderen Achse führt aktives Experimentieren zur *Erweiterung* (Extension) des Problemverständnisses, reflexive Beobachtung eher zur *zweckgerichteten Vertiefung* (Intention). Lernprozesse verlaufen immer dann besonders erfolgreich, wenn dieses zyklische Modell im konkreten Lernprozess – bei Berücksichtigung individueller Lernstile – geschlossen durchlaufen wird. So behindert z.B. das Verbleiben ausschließlich auf der Ebene des aktiven Experimentierens und der konkreten Erfahrungen die Anpassung und Übertragbarkeit erworbenen Wissens auf neue Problemsituationen, was in vielen problembasierten bzw. projektorientierten Lehrkonzepten vernachlässigt wird. Die alleinige Konzentration auf reflexive Beobachtung und abstrakte Konzeptbildung dagegen unterstützt die Prozeduralisierung des so erworbenen Wissens kaum, was ein zentrales Problem klassischer universitärer Lehrkonzepte ist. Longmuß, Salein und Beate Bender haben auf der Basis des Modells des erfahrungsbasierten Lernens konkrete Lehrveranstaltungs-konzepte für die Projektarbeit in der Konstruktionsausbildung entwickelt und in der Praxis erfolgreich erprobt (LONGMUß ET AL. 1995, LONGMUß 1998, BENDER, (BEATE) & LONGMUß 1999, BENDER, (BEATE) 2001).

Die im Zentrum dieser Arbeit stehende Frage nach der Lehr- und Erlernbarkeit der für erfolgreiches Entwurfs- und Konstruktionshandeln notwendigen Kompetenzen kann also zusammenfassend als die Frage nach Erfolg versprechenden Strategien für die Er-

reichung des Doppelziels Vermittlung *und* Prozeduralisierung heuristischer Problemlösekompetenzen formuliert werden. Die umfangreichste Basis für die explizit-deklarative Regelvermittlung stellt bisher die präskriptive Konstruktionsmethodik dar. Ob sie auch die geeignete Basis für eine erfolgreiche Prozeduralisierung wichtiger Entwurfskompetenzen ist, ist Gegenstand der Laborstudie. Für die Beantwortung dieser Frage wird insbesondere untersucht, welche Vorgehensempfehlungen der präskriptiven Konstruktionsmethodik tatsächlich den Konstruktionserfolg verbessern und ob diese sich mit bisherigen Lehrkonzepten in der gewünschten Weise etablieren lassen.

3 Empirische Untersuchungen des Entwurfshandelns

Parallel zur Entwicklung der präskriptiven Konstruktionsmethodik wurden seit den 1960'er Jahren vor allem im angloamerikanischen Raum und seit den 1980'er Jahren auch im deutschsprachigen Raum empirische Untersuchungen realer oder experimenteller Entwicklungsprozesse durchgeführt und darauf aufbauende deskriptive Vorgehensmodelle entwickelt. Diese Forschung fokussiert darauf, welche Prozesse und Vorgehensweisen in der Entwicklungs- und Konstruktionspraxis typischerweise tatsächlich auftreten. Die meisten dieser Studien haben einen explorativen Charakter, d.h. verzichten auf Hypothesen über zu erwartendes oder „richtiges“ Vorgehen. Häufig sind auch in diesem deskriptiven Forschungszweig präskriptive Aussagen zu finden, die meist aus den empirischen Ergebnissen abgeleitet werden, z.T. jedoch keine Verbindung zu tatsächlich beobachteten Phänomenen erkennen lassen.

Ohne dieses Ziel explizit zu verfolgen, wurde in der empirischen Konstruktionsforschung eine ganze Reihe von Annahmen und Voraussetzungen präskriptiver Konstruktionstheorie getestet. Eine Analyse der Ergebnisse dieser Forschung kann deshalb darüber Aufschluss geben, wie verbreitet – und z.T. auch, wie erfolgreich – die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in der Praxis tatsächlich ist.

Dieses Kapitel dient der Aufarbeitung einer Reihe von für diese Arbeit relevanten Arbeiten aus dem Bereich der empirisch-deskriptiven Konstruktionsforschung sowie der Ableitung konkreter Untersuchungsziele und Hypothesen für die Laborstudie. Der Fokus liegt dabei auf den frühen Phasen der Produktentwicklung, d.h. der Konzept- und frühen Vorentwurfsphase. Die Darstellung der Forschungsergebnisse folgt dabei auch hier (wie in Kapitel 2.1) soweit möglich einem chronologischen Ablauf. In einigen Fällen wird von diesem Vorgehen jedoch abgewichen, um zusammenhängende Forschungslinien einzelner Arbeitsgruppen auch über größere Zeiträume darstellen zu können.

In Kapitel 3.1 werden einige für diese Arbeit besonders relevante internationale Arbeiten ausführlich referiert, in Kapitel 3.2 einschlägige Arbeiten aus Deutschland, die hier eine eigene Forschungslinie darstellen. Zusätzlich werden in Kapitel 3.3 aus einer vergleichenden Analyse der Arbeiten von 27 Autoren bzw. Autorengruppen zehn Hauptmerkmale realer Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse abgeleitet, die die deskriptive Grundlage für die Formulierung von Untersuchungszielen und Hypothesen für den empirischen Teil dieser Arbeit bilden. Diese Untersuchungsziele und Hypothesen werden – unter Einbeziehung der Ergebnisse der präskriptiven Vorüberlegungen zur methodischen Produktentwicklung aus Kapitel 2 – in Kapitel 3.4 dargestellt.

3.1 Deskriptive Konstruktionsforschung im internationalen Kontext

MARPLES 1961 untersuchte Entwicklungsprojekte aus dem Bereich der Verfahrenstechnik in zwei Feldstudien. Das Ziel dieser Untersuchungen war die Erarbeitung von Vorschlägen für die Verbesserung der Qualifikation von berufserfahrenen Konstrukteuren. In der ersten Fallstudie untersuchte er das Vorgehen einer Gruppe von ca. 70 Konstrukteuren bei der Lösung eines Hochtemperaturröhren- und -ventilproblems in der

Kerntechnik, im zweiten Fall sollte ein Team (nicht genannter Größe) von Konstrukteuren und Chemikern ein Wärmetauscherproblem bei der Herstellung industrieller Pulver lösen. Untersucht wurden im Detail die Aktivitäten der beteiligten Akteure, die während des Konstruktionsprozesses beobachtet werden konnten, das für die jeweilige Aktivität benötigte Wissen bzw. die dafür benötigten Fertigkeiten sowie das Auftreten und die Charakteristika von Entscheidungen.

Aus der Analyse von Entscheidungsprozessen leitet Marples ein Vorgehensmodell für die Lösungssuche, Lösungsuntersuchung und Lösungsauswahl bei Neukonstruktionen ab. Demnach sind Entscheidungen zentrales Steuerungselement des Entwicklungsprozesses, was sich in Entscheidungsbäumen darstellen lässt, die sich ausgehend von der anfangs vorläufig formulierten Problemstellung zunächst anhand *konkreter* Lösungsalternativen verzweigen und dabei an jeder Verzweigung aufgrund der Berücksichtigung elementarer Anforderungen und dem Auftauchen neuer Teilprobleme zu neuen (Teil-)Lösungsalternativen führen (Abbildung 3-1).

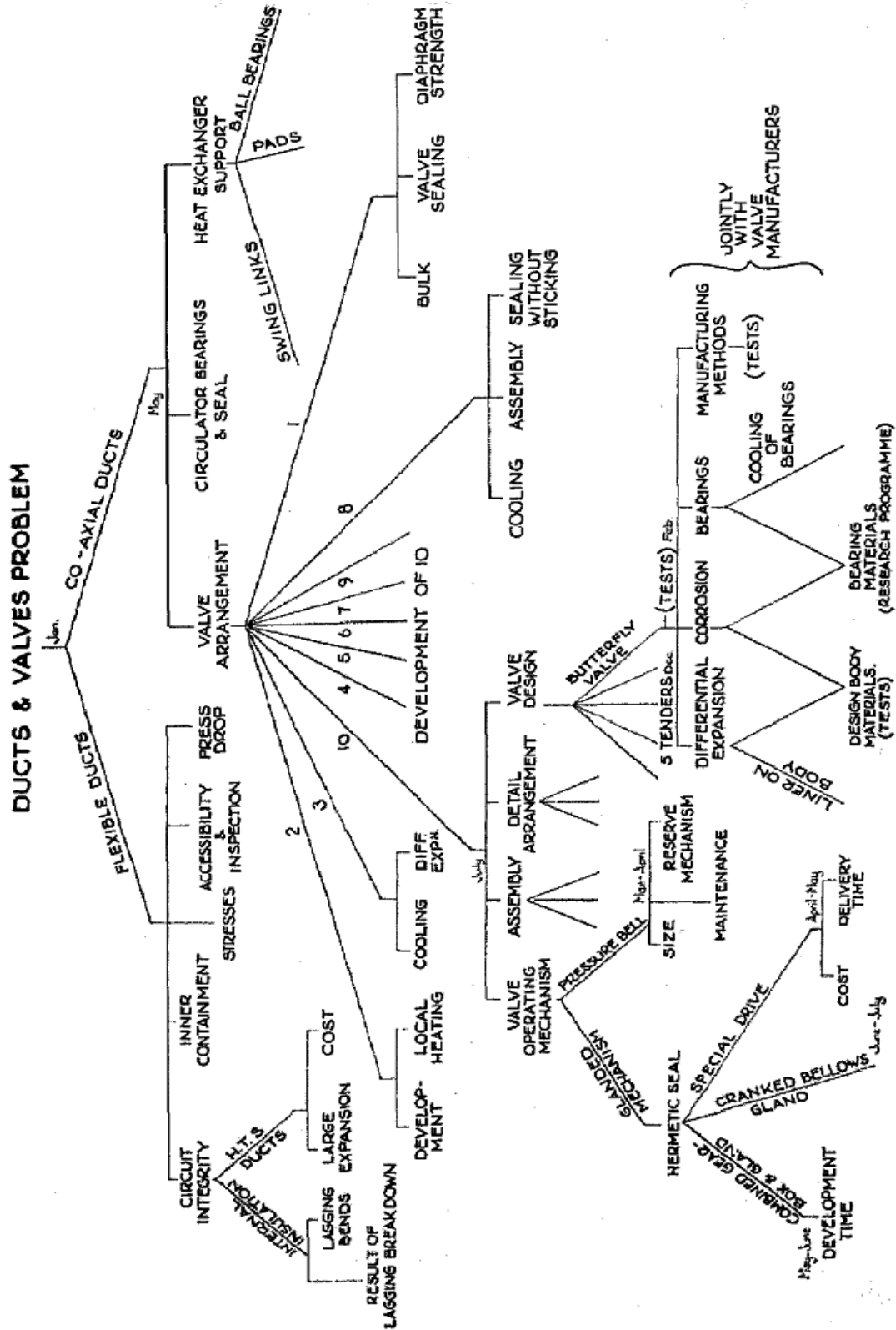


Abbildung 3-1: Entscheidungsbaum des Röhren-/ Ventilproblems (MARPLES 1961, S. 60). Horizontale Linien symbolisieren Unterprobleme, schräge Linien Lösungsalternativen

Das hieraus abgeleitete deskriptive Prozessmodell und die vorgeschlagene Vorgehensstrategie beinhalten ein sequentielles Voranschreiten von der abstrakten Problemformulierung bis zur konkreten Lösung. Die Hauptaufgaben von Entwicklern und Konstrukteuren bestehen dabei zum einen in der Suche nach möglichen Lösungen und zum

anderen in der Sammlung von Informationen über diese Lösungen mit dem Ziel, diese so schnell wie möglich beurteilen zu können (MARPLES 1961, S. 64). Diese Beurteilung erfolgt anhand der an den Verzweigungen des Entscheidungsbaums auftretenden Unterprobleme, die für jede weiter zu verfolgende Lösungsalternative vollständig lösbar sein müssen, bevor auf einem niedrigeren Abstraktionsniveau neue Unterprobleme identifiziert werden, die wiederum durch neue Lösungsalternativen gelöst werden müssen und so fort bis eine zufrieden stellende Lösung gefunden ist. Die parallelen Zweige des Entscheidungsbaums enden jeweils, wenn ein nicht lösbares neues Unterproblem auftaucht. Zur Beurteilung von Lösungsalternativen schlägt Marples ein dreistufiges Bewertungsverfahren vor: „Irrespective of the level [of abstraction], each proposal for the solution of a given problem eventually falls into one of three classes, the first two of which are equivalent to rejection and the last to acceptance. 1) Judged not feasible, [...], 2) Judged feasible but inferior, 3) Judged feasible and the best.” (MARPLES 1961, S. 63) Marples unterscheidet *serielle* und *parallele* Beurteilung mehrerer Lösungsvarianten, und schlägt davon abhängig verschiedene Möglichkeiten der Lösungsbeurteilung und -auswahl vor (MARPLES 1961, S. 64). Obwohl in seinen Fallstudien nicht beobachtet, favorisiert Marples – präskriptiv – eine parallele Lösungsbeurteilung und -auswahl, schlägt jedoch bei offenkundig herausragenden Lösungsvorschlägen vor, den Beurteilungsprozess abzubrechen: „If [...] a number of proposals are thought to be feasible, it would be preferable to examine them in parallel [...] so that, as soon as it is clear that one proposal is inferior to the others, work on it may be stopped. Alternatively, as soon as one proposal is clearly seen to be the best, work can be concentrated on it.” (Marples 1961, S. 64)

Marples schlussfolgert, dass die eigentlichen Kernprobleme erst im Verlauf der schrittweisen Lösungskonkretisierung entlang des o.a. Entscheidungsbaums zu Tage treten. „No one will deny that a problem cannot be fully formulated until it is well on the way to solution. The real difficulty, the nub of a problem, lies somewhere among the subproblems. [...] The nature of the problem can only be found by examining it through proposed solutions and it seems likely that its examination through one, and only one, proposal gives a very biased view. It seems probable, that at least two radically different solutions need to be attempted in order to get, through comparison of subproblems, a clear picture of the ‘real nature’ of the problem.” (MARPLES 1961, S. 64)

Diese Arbeit enthält einige wesentliche Bausteine, die typischerweise später in präskriptiven Modellen des Konstruktionsprozesses auftauchen: Ablauf des Prozesses in Phasen, die schrittweise Lösungskonkretisierung von der allgemeinen Problemformulierung bis zur konkreten Lösung, Gliederung des Produktfortschritts durch kritische Entscheidungen, die sich in Entscheidungsbäumen abbilden lassen und das Konzept, durch objektivierte Beurteilungsverfahren subjektive Einflüsse auf Entscheidungen und Vorfürerungen zu überwinden. Diese Ansätze sind jedoch nur schwach mit den Ergebnissen der Beobachtung des tatsächlichen Vorgehens in den beiden Fallstudien korreliert und es bleibt deshalb offen, ob solche Vorgehensweisen tatsächlich beobachtet wurden.

RAMSTRÖM & RHENMAN 1965 untersuchten in einer Fallstudie ein Entwicklungsprojekt aus der Nuklearindustrie mit – nach eigenen Angaben – geringen Anforderungen an Kreativität und Innovation, das von zwei Konstrukteuren in einem Zeitraum von zwei Monaten bearbeitet wurde. Aufgrund der Analyse von Interviews und Tätigkeitsprotokollen sowie aufbauend auf eigenen theoretischen Vorüberlegungen entwickeln Ramström und Rhenman ein deskriptives Vorgehensmodell, das – unter Verweis auf NEWELL & SIMON 1958 – das Entwickeln und Konstruieren als heuristisches Problemlösen interpretiert und davon ausgeht, dass zur Lösung komplexer Konstruktionsprobleme im wesentlichen vier verschiedene Heuristiken („rules of thumb“) zur Anwendung kommen (RAMSTRÖM & RHENMAN 1965, S. 79):

- “[...] the technique of dividing the problem into sub-problems through use of means-end analysis;
- the use of indirect evaluation criteria, which work as operational subgoals;
- the use of planning techniques, i.e., defining in broad terms a certain course of action without specifying in detail the program required for its achievement;
- the replacement of optimal goals by goals with a lower level of aspiration, i.e., a solution is accepted when it is considered ‘good enough’ of ‘satisfactory’, even if it does not represent an optimal result.”

Der konkrete Fortschritt eines Entwicklungsprojektes kann dabei anhand verschiedener Dimensionen beschrieben werden, die jeweils unterschiedliche Sichten auf das Projekt darstellen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: *Taxonomie zur Charakterisierung von Konstruktionsprojekten (nach RAMSTRÖM & RHENMAN 1965, S. 80f.)*

Dimension	Beschreibung
Need dimension	Kundenanforderungen, die den Konstruktionsprozess maßgeblich determinieren und die während des gesamten Prozesses davon beeinflusst werden, wie der Kunde selbst seine Situation und den Produktfortschritt beurteilt
Product dimension	Technische Produktmerkmale, die das konkrete Produkt, das sich aus der Umsetzung der Kundenanforderungen ergibt, definieren
Control dimension	Administrative Projektmerkmale, die für das Management des Konstruktionsprojektes nötig sind (z.B. Termine)
Engineering dimension	Technische Kriterien, die bei der Umsetzung der Kundenanforderungen in ein konkretes Produkt berücksichtigt werden müssen (z.B. Festigkeit)

Unter Verweis auf MARPLES 1961 wird ausgeführt, dass in der Praxis kein direkter Weg von den Anforderungen zum konkreten Produkt führt und dass zudem in der Regel mehrere Lösungsalternativen zur Verfügung stehen. Es müssen deshalb laufend Entscheidungen getroffen werden, die den weiteren Produkt- und Prozessfortschritt steuern. Die Autoren identifizieren vier unterschiedliche Typen von Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: *Taxonomie zur Charakterisierung von Konstruktionsentscheidungen (nach RAMSTRÖM & RHENMAN 1965, S. 82)*

Entscheidungstyp	Beschreibung
Limitation	Entscheidungen, die aufgrund einer vergleichenden Beurteilung von Lösungsalternativen ungeeignete Lösungen aussondern. Dabei müssen die verbleibenden Lösungsalternativen eine Untergruppe der Lösungen abbilden, die zu Beginn des Entscheidungsprozesses vorhanden waren.
Generalization	Umkehrung von 'limitation'-Entscheidungen zu späteren Zeitpunkten im Konstruktionsprozess auf Grund neuerer Erkenntnisse, so dass die Lösungsbreite wieder erhöht wird
Change	Entscheidungen, die wie 'limitation'-Entscheidungen aufgrund einer vergleichenden Beurteilung von Lösungsalternativen ungeeignete Lösungen aussondern, jedoch aufgrund der dabei gewonnenen neuen Erkenntnisse neue Lösungsalternativen erzeugen.
Reformulation	Entscheidungen, die zu einer Veränderung der Dimensionen führen, die den Ablauf des Entwicklungsprojektes bestimmen (vgl. Tabelle 3-1), z.B. die Einführung neuer Kundenanforderungen oder Terminänderungen.

Ramström und Rhenman betonen als Schlussfolgerung aus ihren Beobachtungen die dynamische Veränderung von Randbedingungen als charakteristische Eigenschaft von Entwicklungsprojekten sowie die Notwendigkeit, bei der Entscheidungsfindung die Menge der parallel verarbeiteten Informationen zu beschränken. „We also predict that, in various stages of a project, attention will be focused on different dimensions, which means that at any given time only a few aspects or dimensions will be under consideration. In conclusion, we may thus say that engineering work consists simultaneously of transforming values from one set of dimensions to another and limiting the alternative courses of action. The picture is further complicated by the changes which can take place during the construction period with regard to the dimensions applied, as well as to the values given to the need, control, and engineering dimensions.“ (RAMSTRÖM & RHENMAN 1965, S. 82)

EASTMAN untersuchte das Vorgehen von sechs berufserfahrenen Architekten beim Lösen einfacher architektonischer Gestaltungsprobleme wie z.B. der Anordnungsplanung von Badmöbeln auf einem vorgegebenen Grundriss (EASTMAN 1968, EASTMAN 1970). Dabei konnte beobachtet werden, dass der Grad der anfänglichen Problemdekomposition stark unterschiedlich ausgeprägt war, was sich in der unterschiedlichen Anzahl der Anforderungen und einschränkenden Randbedingungen, die von den Versuchspersonen explizit formuliert wurden, ausdrückte. Von dieser anfänglichen Problemdekomposition hing ab, welche Problemrepräsentation und welches Abstraktionsniveau für die weitere Bearbeitung gewählt wurden. Zudem wurde zwischen diesen Formen der Problemrepräsentation ständig gewechselt. „Generally a clear correspondence was found between the kinds of constraints that could be considered and the representations used. One of the strength of the human problem-solver is his ability to use several representations – words, numbers, flow diagrams, plans, sections, perspectives – to represent, compare, and manipulate information. [...] any methodology must also be able to include within it all information relevant to design or it must allow a designer to work back and forth between representations.“ (EASTMAN 1970, S. 30) Wesentliches Merkmal hervorragender Versuchspersonen war zudem ihre Fähigkeit, auf bisheriges Wissen strukturiert und prozeduralisiert zuzugreifen. „[...] it has been found, that those relying on direct re-

trieval from memory are far superior to those who rely on external cues for generating problem constraints. Also, while most seemed to retrieve constraints from memory randomly, certain [subjects] seemed to have ‚automatically‘ organized considerations in memory so that they could be retrieved in a highly structured form.“ (EASTMAN 1970, S. 30)

Auch die beobachteten Vorgehensstrategien waren individuell sehr unterschiedlich. So konnte eine Gruppe von objektorientierten und eher generierenden Strategien beobachtet werden, bei denen einzelne Konstruktionsobjekte nacheinander in einem trial-and-error Prozess bei sehr großer Lösungsbreite manipuliert wurden, bis ein zufrieden stellender Zustand erreicht war. Eine andere Gruppe von (eher korrigierenden) Strategien war geprägt von einem ständigen rekursiven Wechsel zwischen Problemdefinition, heuristischer Lösungssuche und Lösungsbeurteilung bei geringer Lösungsbreite, bis auch hier ein zufrieden stellender Zustand erreicht war. Die Beurteilungsschritte bestanden dabei in der überwältigenden Mehrzahl aus groben (binären) Bewertungen oder Grenzwertbetrachtungen, immer mit dem Ziel, nicht ideale sondern zufrieden stellende Lösungen zu erzeugen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen formulierte Eastman ein iteratives Vorgehensmodell für die Lösung von Entwurfsproblemen, das wesentlich auf iterativen Suchheuristiken basiert (Abbildung 3-2).

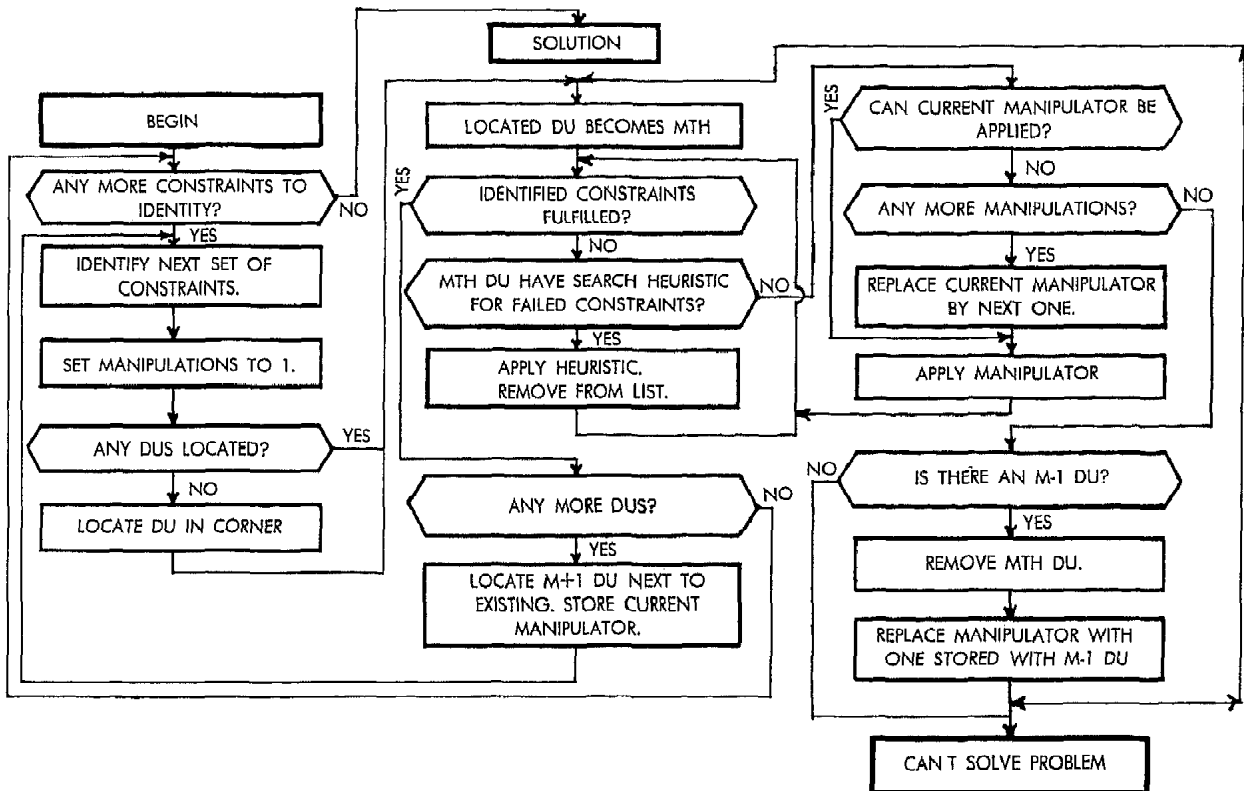


Abbildung 3-2: Heuristisches Problemlösen im Entwurfsprozess (EASTMAN 1970, S. 31, DU=Design Unit)

In diesem Modell werden *Design Units* (DU) iterativ solange manipuliert und das Ergebnis dieser Manipulation beurteilt, bis eine zufrieden stellende Lösung gefunden ist.

Eastman war in der Lage, die von ihm beobachteten individuellen Vorgehensstrategien retrospektiv in diesem Modell abzubilden.

Ende der 1970'er Jahre wurden in der Behavioral Sciences Group am IBM T.J. Watson Research Center eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die Erkenntnisse über die kognitiven Grundlagen des kreativen Entwerfens (mit dem Fokus auf Softwareentwicklung) erbringen sollten (u.a. THOMAS & CARROLL 1979, MALHOTRA ET AL. 1980 und CARROLL ET AL. 1980). Die Arbeitsgruppe untersuchte Probleme aus dem Bereich Softwareentwicklung in verschiedenen Experimenten und verglich die Ergebnisse mit solchen aus Experimenten in anderen Bereichen des schöpferischen Entwerfens. Als theoretischer Rahmen fungierte auch hier das Konzept des Design Problem Solving. Ausgangspunkt für diese Untersuchungen war eine grundsätzliche Unzufriedenheit mit den vorhandenen theoretischen Ansätzen zur Beschreibung von Entwurfsprozessen, die nach Auffassung der Autoren drei Hauptmängel aufwiesen: „(1) They do not adequately differentiate design from other kinds of problem solving. (2) They do not provide a basis for empirical validation. (3) They do not provide a unified framework for viewing all aspects of the design process.“ (MALHOTRA ET AL. 1980, S. 120)

In zwei Fallstudien fanden sie auf der Basis einer Analyse von Dialogen (design dialogs) zwischen Softwareentwicklern und Auftraggebern heraus, dass diese Dialoge in sechs Phasen abliefen (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Stufen des Entwicklungssdialogs zwischen Auftraggeber (Customer=C) und Entwickler (Designer=D) (MALHOTRA ET AL. 1980, S. 121)

State	Main speaker
1. Goal statement	C
2. Goal elaboration	C & D
3. (Sub) solution outline	D
4. (Sub) solution elaboration	D
5. (Sub) solution explication	C & D
6. Agreement on (sub) solution	C

Entscheidend war dabei, dass dieser dialogische Prozess nicht linear von der Zieldefinition bis zur Lösung ablief, sondern in regelmäßig wiederkehrenden Schleifen, in denen diese Phasen zwar jeweils nacheinander durchlaufen wurden, der Dialog jedoch regelmäßig wieder auf die erste Stufe (goal statement) zurücksprang (Abbildung 3-3).

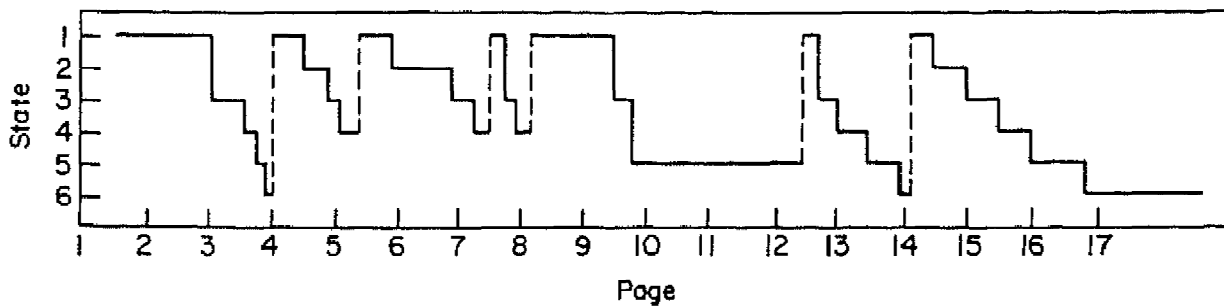


Abbildung 3-3: zyklische Dialogstruktur nach MALHOTRA ET AL. 1980, S. 123

Die Autoren betrachten diese Entwicklungszyklen nicht als Abweichung von einem Ide-alprozess sondern sehen sie als konstitutiv für ein allgemeines Vorgehensmodell an. Hierbei stellen sie fest, dass unabhängig von der *prozeduralen* Regelmäßigkeit, mit der man diese Zyklen beobachten kann, die *Inhalte* in den einzelnen Zyklen stark variieren können. „Further examination of the dialogs reveals, however, that beneath the regularity of structure lies a diversity of content. At the simplest level, a cycle may start with a fresh set of requirements (at the start of a dialog or after an acceptable sub-solution) or it may start with merely an elaboration of previously mentioned requirements (after a rejected sub-solution). Similarly, there are differences in the extent and character of solution elaboration and explication depending on specific circumstances. At a deeper level, although solution suggestions and discussions always follow discussion of requirements, the solution that is outlined and discussed needs not cover the requirements that precede it.” (MALHOTRA ET AL. 1980, S. 123)

In zwei weiteren Experimenten sollten Softwareentwickler unabhängig voneinander zwei verschiedene Programmieraufgaben lösen. Verglichen wurden die Ergebnisse dieser Experimente mit den Ergebnissen ähnlicher Experimente, jedoch aus softwarefernen Bereichen des kreativen Entwerfens wie dem architektonischen Entwurf eines Restaurants, dem Entwurf eines Sessels oder dem Schreiben eines Briefes. Die Analyse des Vorgehens ergab, dass kein einheitliches zielgerichtetes Vorgehen beobachtet werden konnte und auch die Art der Repräsentation der Entwurfsergebnisse erhebliche Unterschiede aufwies. Insbesondere wurden sehr verschiedene Datenstrukturen und Algorithmen eingesetzt, ohne dass die Versuchspersonen retrospektiv dafür jeweils überzeugende Gründe nennen konnten. „In light of the model of the design process [...], the subjects were provided with top-level goals and came up with widely divergent sets of functional requirements. Thus, the sub-goals or solution strategies generated for the higher level goals seemed to vary widely and there did not seem to be an orderly procedure for generating the strategies. In fact, the sub-goals suggested by people seem idiosyncratic and to depend strongly on past experience.” (MALHOTRA ET AL. 1980, S. 128)

In einer weiteren Studie wurde der Zusammenhang zwischen Merkmalen der Problemrepräsentation (Problemstruktur) und Merkmalen der Lösung (Lösungsstruktur) untersucht. Dabei konnten drei charakteristische Zusammenhänge zwischen den Variablen identifiziert werden:

- Hohe Instabilität im Vorgehen führt zu Lösungen, die die Problemstruktur schlechter abbilden als bei einem Vorgehen, bei dem die Lösung über den Prozess relativ stabil bleibt.
- Lösungen, die die Problemstruktur besser widerspiegeln, sind besser, d.h. sie erfüllen auch die Anforderungen vollständiger.
- Instabiles Vorgehen erhöht die Bearbeitungsdauer, was auf größere Rücksprünge im Prozess zurückzuführen ist.

Zusammenfassend wird aus den Befunden dieser Studien ein deskriptives Modell des Entwicklungsprozesses abgeleitet, das sich aus drei Phasen zusammensetzt. In der *Goal Elaboration*-Phase werden aus übergeordneten Problemformulierungen durch Dekomposition Teilziele abgeleitet und daraus wiederum *functional requirements*, deren Formulierung das Ende dieser Phase markiert. Aus den *functional requirements* werden in der *Design Generation*-Phase konkrete Entwürfe abgeleitet, die in der *Design Evaluation*-Phase gegenüber den im ersten Schritt definierten Teilzielen und Anforderungen beurteilt werden. In dieser letzten Phase können neue Teilziele und Anforderungen identifiziert werden, was zu einem rekursiven erneuten Durchlaufen der drei Teilschritte führt, bis eine akzeptable Lösung, d.h. eine befriedigende Erfüllung der funktionalen Anforderungen erreicht ist. „This model differs from most previous attempts to describe design as a sequence of steps in three ways: (1) it explicitly allows iteration and recursion; (2) it provides criteria for identifying phases of design; (3) it provides a framework within which specific hypotheses can be empirically tested.“ (MALHOTRA ET AL. 1980, S. 120)

In einer umfangreichen Feldstudie beobachtete Hales (HALES 1987(1991), WALLACE & HALES 1987) 34 Monate lang insgesamt 37 Produktentwickler im Rahmen eines komplexen Entwicklungsprojektes aus dem Maschinenbau. Es handelte sich dabei um einen internen Auftrag für die Entwicklung eines Prüfstandes und das Projekt wurde unter Anwendung des Vorgehensmodells von PAHL & BEITZ 1984 durchgeführt. Hales war dabei als „Main Consultant“ Beteiligter an diesem Projekt. Unter Bezug auf PAHL & BEITZ 1984 gliedert er den Produktentwicklungsprozess in die vier Phasen *task clarification*, *conceptual design*, *embodiment design* und *detail design* und bettet diese in ein *context model*, das die Einbindung der Produktentwicklung in übergeordnete organisationale und ökonomische Strukturen widerspiegelt, ein (Abbildung 3-4).

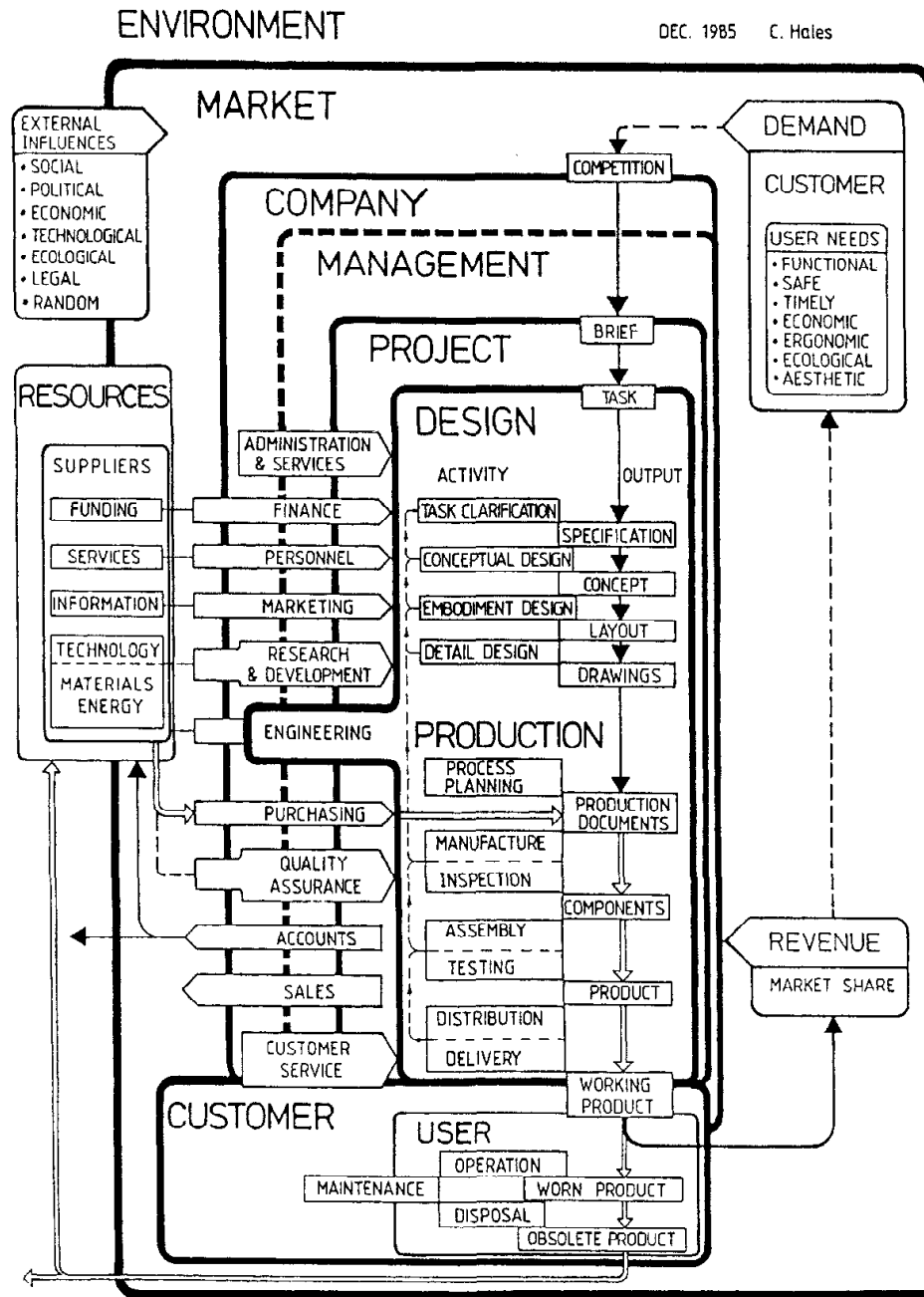


Abbildung 3-4: Modell des Produktentwicklungsprozesses im industriellen Kontext (WALLACE & HALES 1987, S. 96)

Hales ordnet alle im Verlauf der Feldstudie beobachteten Aktivitäten des Entwicklungsteams den vier Hauptphasen der Produktentwicklung sowie der Produktplanungsphase (*design proposal*) zu und erhält so eine Übersicht über den realen zeitlichen Verlauf des Projektes und die zeitlichen Anteile der einzelnen Entwicklungsphasen. Dabei konnte beobachtet werden, dass diese Hauptphasen im realen Prozess tatsächlich abgrenzbar existierten und sich die Entwicklungstätigkeiten ihnen zuordnen ließen. Die zeitliche Abfolge war jedoch abweichend vom präskriptiven Modell von Überlappungen und Rücksprüngen gekennzeichnet (Abbildung 3-5).

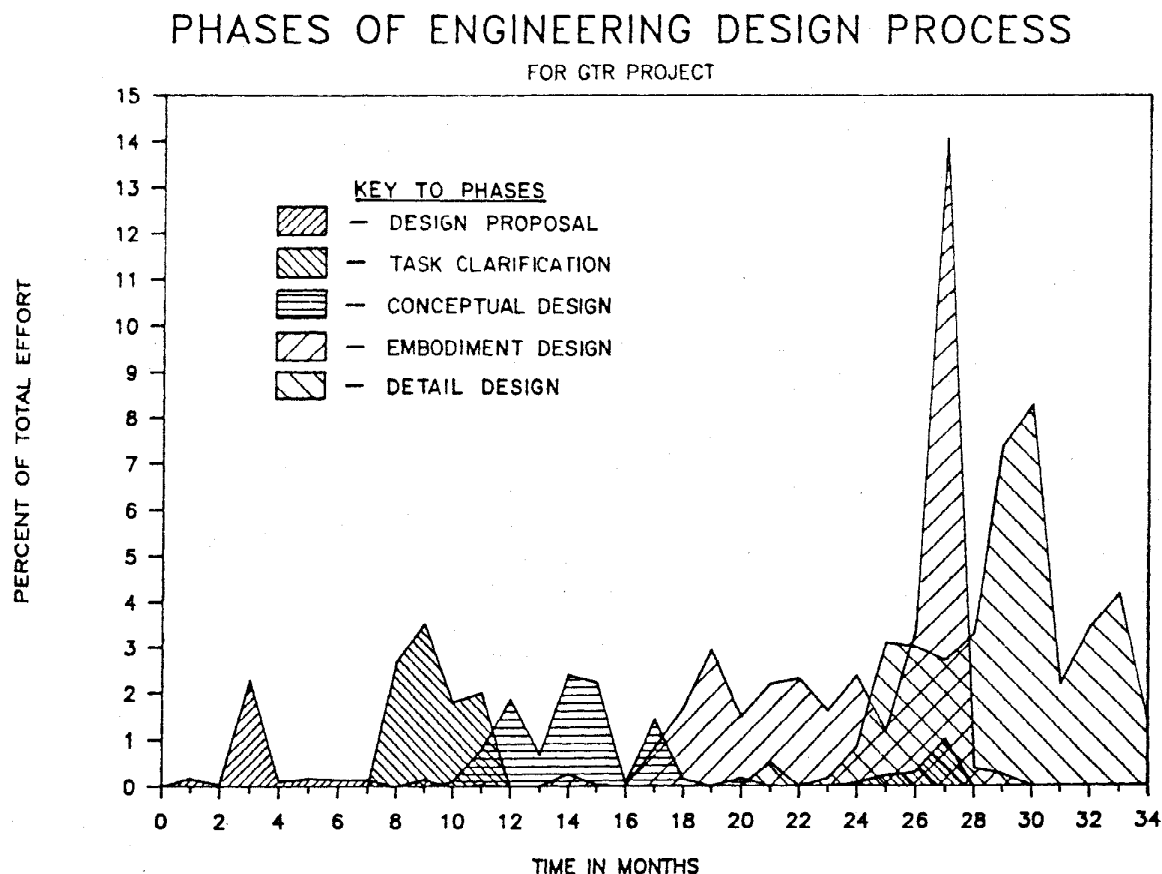


Abbildung 3-5: Realer Produktentwicklungsprozess (WALLACE & HALES 1987, S. 99)

Auffällig war z.B., dass schon im 13. Monat des Projektes – d.h. noch in der ersten Projekthälfte – Entwurfsaufgaben erledigt wurden, während es noch bis zum 30. Monat immer wieder Rücksprünge in die Aufgabenklärungsphase gab, mit einem – teuren – späten Maximum im 27. Monat. Hales schließt aus seinen Detailbeobachtungen, dass die Überlappungen der Prozessphasen weder vermeidbar noch schädlich im Sinne des Projektergebnisses und des dafür benötigten Aufwandes waren, dass sich jedoch die Vor- und Rücksprünge im Prozess vor allem auf den Entwicklungsaufwand negativ ausgewirkt hatten.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis war, dass in der Aufgabenklärungs- und Konzeptphase nur knapp die Hälfte der für das Projekt benötigten Arbeitszeit für direkte Entwurfstätigkeiten, die sich eindeutig den Konstruktionsphasen zuordnen lassen, aufgewendet wurde. In der anderen Hälfte wurden andere Aktivitäten verfolgt, die dem Projektfortschritt indirekt dienten (Abbildung 3-6).

THE DESIGN EFFORT AS PART OF DESIGN TEAM EFFORT

Task Clarification & Conceptual Design		Gasifier Test Rig			
Design Process Steps		Time	0	25%	50%
Clarifying the task		34%			
Abstracting to identify essential problems		1%			
Establishing function structures		1%			
Searching for solutions	Intuitive e.g. brainstorming	4%			
	Discursive	1%			
Combining solution principles and selecting qualitatively		2%			
Firming up into concept variants	Preliminary calculations	1%			
	Preliminary layouts	0%			
Evaluating concept variants		1%			
Sub-Total		45%			
General Activities					
Personal Work Planning		6%			
Information Retrieval		6%			
Cost Estimating		12%			
Reporting & Reviewing		28%			
Helping With Other Projects		0%			
Social Contact		3%			
Sub-Total		55%			
		100%			

Abbildung 3-6: Aufwandsverteilung im Entwicklungsprojekt in der Aufgabenklärungs- und Konzeptphase (HALES 1987(1991), S. 67)

Es handelte sich dabei vor allem um Projektmanagement-Aktivitäten, die in präskriptiven Modellen des Produktentwicklungsprozesses oft vernachlässigt werden, für den Erfolg eines Entwicklungsprojektes aber in der Regel kritische Faktoren darstellen.

Auf den fünf Ebenen seines Prozessmodells definierte Hales zudem aufgrund einer Literaturstudie eine Reihe von Haupteinflussfaktoren auf den Produktentwicklungsprozess, von denen er einige in seinen Beobachtungen bestätigt fand (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Identifizierte Haupteinflussfaktoren auf den Produktentwicklungsprozess (HALES 1987(1991), S. 104)

SUMMARY OF INFLUENCES AT FIVE LEVELS OF RESOLUTION		
RESOLUTION LEVEL	INFLUENCE CATEGORY	CONTRIBUTING FACTORS
Macroeconomic	External Influences:	Political; Economic.
Microeconomic	Market:	Demand; Competition
	Resource Availability:	Information; People.
	Customer:	Clarity and Urgency of Need; Expectations; Involvement.
Corporate	Corporate Structure:	Project Autonomy.
	Corporate Systems:	Information Use; Environment; Pay and Benefits.
	Corporate Strategy:	Clarity of Objectives; Risk-Taking; Involvement.
	Shared Values:	Commitment; Enthusiasm.
	Management Style:	Benevolent Element.
	Management Skills:	Communication; Utilization of Resources; Representation.
	Management Staff:	Number; Decision-Making; Confidence.
Project	Design Task:	Novelty; Technical Risk.
	Design Team:	Expertise; Experience; Role-Balance; User-Involvement; Commitment; Motivation.
	Design Techniques:	Systematic Approach; Listing Requirements; Questioning; Negotiating; Reviewing and Reporting; Raising Enthusiasm.
	Design Output:	Productivity; Work Quality.
Personal	Knowledge:	Applicability.
	Skills:	Competence; Versatility; Negotiating Power.
	Attitude:	Self-Discipline; Standards.
	Motivation:	Enthusiasm; Involvement; Tenacity.
	Output:	Productivity; Work Quality.

Auch hier wird deutlich, dass neben den technisch-funktionalen Anforderungen eine Vielzahl externer Einflüsse bei der Planung und Steuerung eines Produktentwicklungsprojektes den Erfolg maßgeblich beeinflussen.

Eine Arbeitsgruppe um Ullman (u.a. STAUFFER ET AL. 1987, Ullman & Dietterich 1987, STAUFFER & ULLMAN 1988, ULLMAN ET AL. 1988, Stauffer 1989 und STAUFFER & ULLMAN 1991) untersuchte in einer Reihe von Studien Entwurfsprozesse aus dem Bereich des Maschinenbaus und machte die Ergebnisse zur Grundlage eines umfassenden deskriptiven Vorgehensmodells (vor allem ULLMAN ET AL. 1988).

Um herauszufinden, inwieweit präskriptive Vorgehensmodelle in realen Konstruktionsprozessen eine Entsprechung finden, wurden sechs Versuchspersonen mit komplexen mechanischen Konstruktionsaufgaben konfrontiert. Dabei konnte beobachtet werden, dass die Versuchspersonen (STAUFFER ET AL. 1987, S. 77 und 83f.)

- oft nur ein einziges Lösungskonzept mit z.T. sehr früher Konkretisierung verfolgten;
- im Laufe des Entwurfsfortschritts von einem systematischen zu einem „opportunistischen“⁹ Vorgehen wechselten;
- anstelle einer vollständigen Funktionsanalyse zum Beginn funktionale Aspekte ihrer Konstruktion abschnittsweise während des gesamten Prozesses der Problemlösung betrachteten;
- zwischen verschiedenen Arten der Problemrepräsentation wechselten, d.h. funktionale Überlegungen überwiegend qualitativ anstellten, während Überlegungen zur Formgestaltung oft quantitativ waren;
- ihre Entscheidungen während des gesamten Prozesses vor allem auf der Grundlage von qualitativen, subjektiven Schlussfolgerungen trafen;
- überwiegend persönliches Wissen für die Lösungsfindung und Lösungsbewertung sowie zur Lösung von Problemen einsetzten;
- mentale, visuelle und physikalische Simulationen nicht nur zur Dokumentation, sondern vor allem als Hilfe zum Problemverständnis und zur Lösungsbewertung einsetzten;
- eher zufrieden stellende als optimale Lösungen für die vorliegende Problemstellung anstrebten.

Die Autoren schlussfolgern, dass Konstrukteure in der Regel nicht im Einklang mit Vorgehensmodellen der präskriptiven Konstruktionsmethodik (hier repräsentiert durch die Ansätze von Hubka und Pahl & Beitz) handeln und fanden dies in einer vergleichenden Analyse von sechs weiteren empirischen Studien bestätigt (STAUFFER & ULLMAN 1988). Sie schlagen deshalb ein deskriptives Vorgehensmodell vor und postulieren zunächst ein iteratives Informationsverarbeitungsmodell für die Bearbeitung handhabbarer Teilprobleme, bei dem die Schritte *synthesis*, *analysis* und *compare* durchlaufen werden, bis ein ideales Ergebnis vorliegt (Abbildung 3-7). “In the design process, synthesis and

⁹ Diese Arbeit ist die erste, in der das Konzept des *opportunistischen* Vorgehens, das von HAYES-ROTH & HAYES-ROTH 1979 für kognitive Planungsvorgänge etabliert wurde, in der deskriptiven Konstruktionsforschung explizit Anwendung findet.

analysis are wrapped together in an iteration loop. Ideas are analyzed to enough depth to ascertain their validity and are used to develop other ideas, with the depth of analysis increasing as the final choice is approached. This synthesis-analysis loop is fundamental to the design process.” (ULLMAN & DIETTERICH 1987, S. 24)

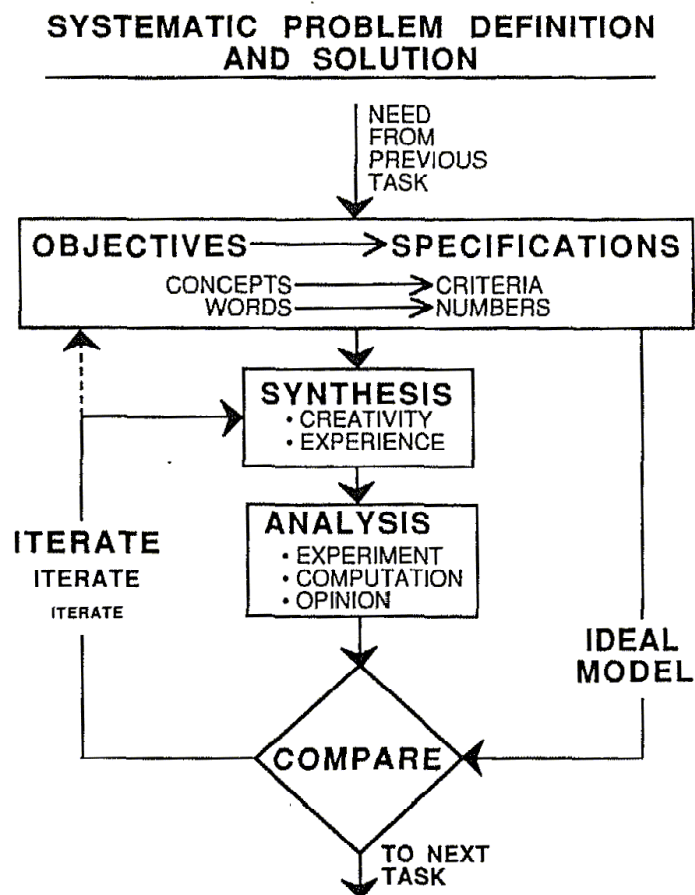


Abbildung 3-7: Task model design (ULLMAN & DIETTERICH 1987, S. 23)

Für die Konzeptphase werden kognitive Basisaktivitäten („intellectual tasks“) und Problemlösemethoden definiert, die den Hauptphasen Anforderungsdefinition („specification development“) und Vorentwurf („preliminary design“) zugeordnet werden (Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Arbeitsschritte, Aktivitäten und Problemlösemethoden beim Entwerfen (nach ULLMAN & DIETTERICH 1987, S. 26f.)

Phase	Arbeitsschritt	Kognitive Aktivität	Problemlösemethode
Anforderungsdefinition (Specification Development)	Anforderungsdefinition (Specification development)	Identifikation zusätzlicher Randbedingungen	Analyse vorhandener Lösungen, Nutzung von Erfahrungswissen und Analogien
	Anforderungsbeurteilung (Specification assessment)	Überprüfung auf Vollständigkeit	Fortschreiten, bis keine neuen Anforderungen gefunden werden können
	Anforderungsverfeinerung (Specification refinement)	Ableitung von Teilzielen oder –anforderungen	Qualitative Simulation, Anwendung von Kausalitätsregeln
	Anforderungsanpassung (Specification patching)	Anpassung von Zielen, so dass diese leichter erfüllt werden können	Simulation, Anpassung von Zielen nach Lösungskonkretisierung
	Suche nach neuen Lösungen (Innovation search)	Finden neuer Problemlösungen, obwohl bekannte Lösungen existieren	Rekapitulation früherer Entwicklungsprozesse und Durchdenken alternativer Entscheidungswege
Vorentwurf (Preliminary Design)	Komponentenverfeinerung (Component refinement)	Erweiterung der Beschreibung von Komponenten	„generate and test“
	Komponentenanpassung (Component patching)	Modifizierung von Komponenten zur Anpassung an die Anforderungen	Austausch vorhandener Komponenten durch ähnliche, Erweiterung von Komponenten durch zusätzliche
	Komponentenintegration (Component configuration)	Festlegung von Lage und Funktionszusammenhang verschiedener Komponenten zueinander	Kraftflussanalyse, geometrische Untersuchungen
	Konfigurationsanpassung (Configuration patching)	Finden von Unverträglichkeiten in Konfigurationen	Verändern (Invertieren, transformieren, drehen, ...) von Funktionen, Wirkmechanismen oder Komponenten, Verändern der Größe oder Anzahl von Komponenten
	Analyse existierender Entwürfe (Design recognition)	Analyse existierender Systeme zur Identifikation zugrunde liegender Anforderungen und Randbedingungen	Erkennen typischer Merkmale, Nachvollziehen des Entwicklungsprozesses und der Entwurfsentscheidungen
	Beurteilung von Überarbeitungsschritten (Refinement evaluation)	Analyse vorgeschlagener Entwurfsüberarbeitungen nach den Kriterien Machbarkeit und Wünschbarkeit	Qualitative Simulation, quantitative Analyse, Untersuchung von Einzelmerkmalen wie Fertigung, Kosten etc.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich ein umfassendes Vorgehensmodell für den Konstruktionsprozess im Maschinenbau, das in ULLMAN ET AL. 1988 anhand der Beobachtung von fünf Konstrukteuren aus dem Maschinenbau überprüft wird. Dieses *Task-Episode Accumulation* (TEA)-Modell besteht aus den folgenden Hauptkomponenten (Abbildung 3-8):

- **Task** beschreibt eine Gruppe zusammenhängender Unterziele, die gemeinsam behandelt werden müssen. Tasks werden im TEA-Modell nach verschiedenen Abstraktionsstufen klassifiziert und sind am ehesten analog zu den in präskriptiven Modellen gebräuchlichen Hauptphasen zu betrachten.
- **Episoden** beschreiben eine sinnvolle Kombination elementarer kognitiver Aktivitäten (**Design Operators**), die jeweils auf die Erreichung eines einfachen Unterziels gerichtet sind. „To accomplish a design, the design engineer applies the primitive operators in meaningful sequences called episodes. An episode is a sequence of operator applications that addresses some primitive goal.“ (ULLMAN ET AL. 1988)
- **Accumulation** beschreibt den Prozess der schrittweisen Erreichung eines Entwicklungsziels durch die Akkumulation einzelner Beiträge elementarer Aktivitäten (bzw. Design operators) im Rahmen von Episoden zu dem Gesamtergebnis.

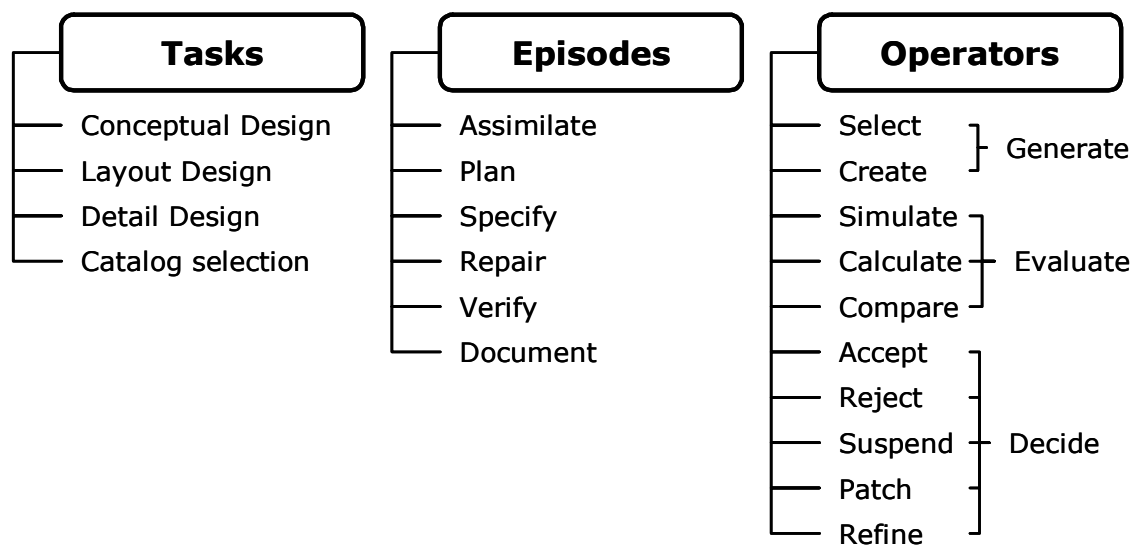


Abbildung 3-8: Elemente des TEA-Modells (nach ULLMAN ET AL. 1988)

Obwohl in diesem Vorgehensmodell kein vorab aufzustellender globaler Vorgehensplan vorgesehen ist, gibt es eine hierarchische Abstufung von Zielen, die jedoch erst aufgrund einer schrittweisen Top-Down Dekomposition in der aktuellen Entwicklungssituation – akkumulativ – handlungsleitend werden. „According to the TEA model, the goal structure of the design process has three main levels. At the highest level is the main goal comprising the satisfaction of the given constraints. This top-level goal is decomposed into finer goals, each of which is solved by a single task. These task-level goals are further decomposed into the primitive goals that are addressed by an episode.“ (ULLMAN ET AL. 1988, S. 39) Die hierarchische Dekomposition der Ziele kann als gegen-

läufiger Prozess zur Lösungsakkumulation auf der Basis elementarer Entwicklungsepisoden und Entwicklungsaktivitäten (Operatoren) angesehen werden (Abbildung 3-9).

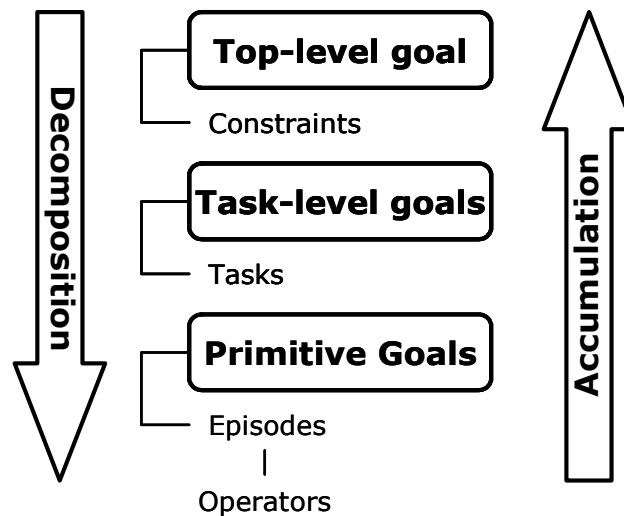


Abbildung 3-9: Zielhierarchie im TEA-Modell (nach ULLMAN ET AL. 1988)

STAUFFER 1989 und STAUFFER & ULLMAN 1991 erweitern das TEA-Modell um elementare Strategien für die Anwendung der *Operatoren*, die sie als *lokale Methoden* bezeichnen. Es handelt sich dabei um elementare Strategien des heuristischen Problemlösens (vgl. Kapitel 2.3.2) von denen sie vier Methoden¹⁰ hervorheben, die als Strategien die Anwendung der Operatoren der drei Klassen *Generate*, *Evaluate* und *Decide* (vgl. Abbildung 3-8) steuern:

- Generate and test
- Generate and improve/ hill climbing
- Means end analysis/ heuristic search
- Deductive thinking

Diese vier Strategien zum Umgang mit unscharf definierten und unscharf strukturierten Problemen stellen Strategien der lokalen Handlungsregulation dar, die auf elementare, „primitive“ Zielstellungen angewandt, Handlungsepisoden steuern. Sie werden eingesetzt, nachdem ein globales Ziel durch hierarchische Dekomposition in „primitive“, handlungsleitende Teilziele zerlegt wurde. Ihnen gemeinsam ist ein regelkreisförmiger Charakter, der eine zeit- und teilproblemnahe Überprüfung des Erfolges einer Handlungsepisode erlaubt.

Das Vorgehen von drei Softwareentwicklern bei der Bearbeitung eines komplexen Programmierproblems war Gegenstand einer Laborstudie von GUINDON 1990. Guindon fand heraus, dass dabei nur 47% aller identifizierten Arbeitsschritte hierarchisch einem Top-

¹⁰ Die Auswahl und Darstellung der Methoden ist zwischen beiden Publikationen widersprüchlich. Hier wird deshalb die spätere Version aus STAUFFER & ULLMAN 1991 wiedergegeben.

Down-Vorgehensmodell folgten. Die wesentlichen Abweichungen von einem solchen Prozess bestanden (GUINDON 1990, S. 323f.)

- in der vorgehenden Konkretisierung von Teillösungen auf einem weit höherem Konkretisierungsniveau im Vergleich zur bis dahin ausgearbeiteten Gesamtlösung;
- im unvermittelten Erkennen von Lösungsideen für andere Teile des Problems als dem, an dem aktuell gearbeitet wurde;
- in der regelmäßig wiederkehrenden Simulation und Konkretisierung von Anforderungs- und Problemanalyseszenarien über den gesamten Prozessverlauf;
- in der sofortigen Ausarbeitung von Teillösungen für neu erkannte Anforderungen anstelle der Verschiebung auf einen im Sinne systematischer Bearbeitung „richtigeren“ späteren Zeitpunkt;
- in *strategischer*, d.h. absichtlich geplanter, vorgehender Konkretisierung, um durch Detailuntersuchungen neue Lösungsideen zu finden.

Guindon schlussfolgert, dass die Vorgehenssteuerung maßgeblich von der Verfügbarkeit von (Erfahrungs-)Wissen über die Problemstruktur und mögliche Lösungen sowie von Assoziationen geprägt wird und deshalb im Wesentlichen *opportunistisch*, d.h. ad hoc verfügbare Gelegenheiten zur Wissenserweiterung nutzend, abläuft. „Knowledge discovery often led to the unplanned addition of new requirements or new partial solutions. In turn, knowledge discovery was frequently followed by unplanned drastic changes in the design activities.“ (GUINDON 1990, S. 327) Problemklärung und Lösungskonkretisierung verlaufen demnach – verbunden mit iterativen Vor- und Rücksprüngen – parallel und nicht sequentiell. Der besondere Charakter von Entwurfsproblemen mache dabei eine hierarchische und im Prozessverlauf stabile Problem- und Zieldekomposition geradezu unmöglich. „Ill-structured problems, because of their ill-specified goals, prevent the determination of a single and stable high-level goal and of a corresponding initial hierarchical plan of actions to be executed throughout the design process. [...] On the other hand, human expertise is associated with the application of data driven rules. The interaction of the ill-structuredness of a problem with data-driven processing by experts is likely to induce the recognition of partial solutions at various levels of abstraction prior to an overall solution decomposition.“ (GUINDON 1990, S. 329) In Guindons Modell des opportunistischen Entwurfsprozesses ist die wissens- und erfahrungsbasierte Assoziation das zentrale Mittel zur heuristischen Problemlösung und zur Verringerung des kognitiven Aufwands, der mit einer vollständigen Problem- und Zielklärung am Beginn eines Entwurfsprozesses verbunden wäre. „Opportunistic design is characterized by on-line changes in high-level goals and plans as a result of inferences and additions of new requirements. In particular, designers try to make the most effective use of newly inferred requirements, or the sudden discovery of partial solutions, and modify their goals and plans accordingly.“ (GUINDON 1990, S. 337) Die zunächst vorläufige, dann jedoch ständig überprüfte und angepasste Problemdekomposition und Zieldefinition vermeidet, dass später im Prozess erworbenes Wissen über neue Probleme – die erst anhand *kon-*

kreter Lösungsideen erkannt und analysiert werden können – die Ergebnisse einer vorab durchgeführten vollständigen Problem- und Zieldekomposition konterkariert. In diesem Modell ist Erfahrung die entscheidende Ressource zu Handlungssteuerung. Sie ist die Voraussetzung dafür, dass Gelegenheiten zur Problemlösung überhaupt zur Verfügung stehen bzw. im Wege von Assoziation und Transfer auf die aktuelle Problemsituation erkannt werden.

VISSER untersuchte in eigenen Studien und in einer Metastudie (u.a. VISSER 1990, VISSER 1994, VISSER 1995, VISSER 1996¹¹), ob kreative Entwicklungsprozesse tatsächlich hierarchisch strukturiert sind und kommt zu dem Ergebnis, dass Entwickler zwar regelmäßig vorab ihr geplantes und retrospektiv ihr realisiertes Vorgehen als hierarchisch strukturiert beschreiben, dass tatsächlich aber signifikante Abweichungen von solchen Vorgehensplänen im realen Vorgehen beobachtet werden. Das tatsächlich beobachtete Vorgehen kann als *opportunistisch mit hierarchischen Episoden* charakterisiert werden. Abweichungen von hierarchisch strukturierten Vorgehensplänen kommen zustande, wenn sich zum einen Alternativen zum geplanten Vorgehen anbieten und diese zum anderen nach einer Beurteilung auch tatsächlich bevorzugt werden. Die im hierarchisch strukturierten Vorgehensplan „richtige“ Handlung ist dabei nur eine von mehreren Optionen. Um eine Abweichung auszuwählen und zu bevorzugen muss diese als Information zunächst einmal die Bewusstseinssebene erreichen und sich so als Gelegenheit zur Handlungsänderung anbieten. Solche Handlungsoptionen entstehen (VISSER 1994, S. 264ff.):

- durch Informationen, die aus externen Quellen wahrgenommen werden, insbesondere durch Kunden oder Kollegen;
- durch assoziativ gewonnene Informationen, die beim – unwillkürlichen – Umherschweifen („drifting“) im Problemraum gewonnen werden, z.B. wenn dabei offensichtlich nützliche Problemlösungen für ein anderes als das aktuell bearbeitete Problem auftauchen;
- durch Problembetrachtung aus einem anderen Blickwinkel als dem, der zu Beginn der Problembehandlung eingenommen wurde;
- durch Informationen, die als „Abfallprodukte“ von (Teil-)Problemlösungen wahrgenommen werden und dann assoziativ auf andere Problemlösungsaktivitäten übertragen werden können;
- wenn Beziehungen (Analogien, Kausalbeziehungen, Gegensätze, Wechselwirkungen) zwischen Teilproblemen oder mentalen Repräsentationen von Teilproblemen erkannt werden (vgl. ausführlich VISSER 1990, S. 271f.);

¹¹ Vissers eigene Untersuchungen konzentrieren sich auf Softwareentwicklung, wobei dabei teilweise Ingenieure aus der mechanischen Produktentwicklung als Erzeuger von Spezifikationen, die die Grundlage späterer Softwareentwicklung bilden, einbezogen werden. Die Metastudie umfasst Studien aus der Softwareentwicklung, der Architektur und Planungswissenschaft, dem Maschinenbau und alltägliche „Entwurfstätigkeiten“ wie die Planung der Zubereitung einer Mahlzeit (vgl. VISSER 1994, S. 246).

- durch assoziative Übertragung einer gerade ausgeführten Entwicklungsaktivität auf ein anderes, gleichartiges oder ähnliches Teilproblem.

Hauptkriterien, die Entwickler motivieren, von hierarchisch strukturierten Vorgehensplänen abzuweichen, sind der erwartete *kognitive Aufwand* der zur Verfügung Handlungsoptionen und ihre *Wichtigkeit* (VISSER 1990, S. 269f.; VISSER 1994, S. 260ff.)

Der kognitive Aufwand sich anbietender Handlungsoptionen wird vergleichend und subjektiv – dabei überwiegend intuitiv – jeweils bestimmt anhand (VISSER 1990, S. 269)

- der Verfügbarkeit handlungssteuernder *Schemata*;
- der Verfügbarkeit von *Informationen*;
- der *relativen Schwierigkeit* der auszuführenden Handlung.

Auch Visser konstatiert somit eine global opportunistische Handlungssteuerung, betont jedoch, dass ein übergeordneter Plan sehr wohl existiert, von dem jedoch regelmäßig und begründet abgewichen wird. „The engineer had a hierarchically structured plan for his activity, but he used it in an opportunistic way. He used it only as long as it was profitable from the point of view of cognitive cost. [...] The idea developed in this study is that, at the control level of his activity, an expert designer may use a plan for guiding his activity, but that deviations of this plan occur if the control selects an alternative-to-the-planned-action proposal rather than the planned action proposal.“ (VISSER 1990, S. 276)

Blessing (BLESSING 1991, BLESSING 1994) beobachtete in einer Feldstudie über 16 Monate ein Entwicklungsteam bei der Entwicklung eines medizinischen Großgerätes und identifizierte eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf den Entwicklungsprozess (BLESSING 1994, App. IV.3). Dabei zeigte sich, dass vor allem der Informationsaustausch zwischen Personen, insbesondere wenn dabei große hierarchische oder räumliche Distanzen zu überwinden waren, ein kritischer Faktor für den Erfolg des Entwicklungsprojektes war. Weitere zentrale Probleme ergaben sich aus der unklaren Aufgabenstellung und ihrer dynamischen Veränderung über die Projektlaufzeit sowie aus Kapazitätsengpässen. Diese Faktoren waren hauptverantwortlich dafür, dass im Projektverlauf fünfmal grundlegende Änderungen an der Produktspezifikation vorgenommen werden mussten. Zudem geriet das Projekt in Zeitverzug und es mussten große Iterationsschleifen durchlaufen werden. Dabei traten hohe temporäre Arbeitsbelastungsspitzen auf (BLESSING 1991, S. 347). Das Vorgehen des Entwicklungsteams folgte weitgehend einem vorgegebenen stufenweisen Prozess, dabei mussten jedoch regelmäßig Anpassungen vorgenommen werden, die zum einen in einer zeitlichen Verschiebung, zum anderen in Vor- und Rücksprüngen im Prozess bestanden. Diese Abweichungen von konstruktionsmethodischen Vorgaben waren überwiegend in einer frühen Fokussierung auf kritische Problembereiche begründet. Auch war der Entwicklungsfortschritt verschiedener Teilaspekte des Produktes oft nicht synchronisiert. „The unbalanced development of product elements was illustrated by the fact, that some product elements had already been detailed, while at the same time others only existed as a concept. [...] In some

cases, for example, the geometry was already known long before the material was chosen, or one side of a product element had already been specified in detail because of its interface with another product element, while the rest of the product elements consisted of no more than an indication of the shape and some requirements.“ (BLESSING 1994, S. 130) Gründe für unterschiedliche parallele Entwicklungsfortschritte waren oft ausstehende Entscheidungen aus anderen Unternehmensbereichen, auf die einzelne Konstrukteure oder das gesamte Entwicklungsteam keinen Einfluss hatten. Wenn in solchen Fällen die Entwicklung trotzdem weitergehen musste, kamen die folgenden Strategien zum Einsatz (BLESSING 1994, S: 130):

- Erzeugung von Konzeptalternativen,
- Vorwegnahme erwarteter Entscheidungen sowie
- Konzeptänderungen mit dem Ziel der Unabhängigkeit von der ausstehenden Entscheidung (z.B. durch universelle Schnittstellenkonfiguration).

Blessing kommt zu dem Schluss, dass Abweichungen vom präskriptiven „top-down-breadth-first“-Vorgehen unvermeidlich sind und schlägt ein prozessorientiertes Vorgehensmodell als Grundlage einer flexiblen Rechnerunterstützung von Produktentwicklungsprozessen vor. Dieses zweidimensionale Prozessmodell enthält im Kern eine *Design Matrix*, die entlang der einen Achse die konstruktionsmethodischen Prozessphasen mit den für diese Phasen charakteristischen problemorientierten *Sachverhalten* (Issues) abbildet. Diese dienen der globalen Vorgehenssteuerung. Entlang der anderen Achse werden prozessorientierte kognitive *Aktivitäten* abgebildet, die auf die lokale Handlungssteuerung verweisen (Abbildung 3-10).

Title		ACTIVITIES		
		Generate	Evaluate	Select
Problem definition	ISSUES			
Concept	ISSUES			
Detail design	ISSUES			

Abbildung 3-10: *Design Matrix als Kern eines problemorientierten Prozessmodells* (BLESSING 1994, S. 159)

Jede Zelle dieser Matrix repräsentiert dabei einen Typus von Arbeitsschritten im Produktentwicklungsprozess. Analog werden weitere Matrizen auf tieferen Abstraktionsebenen benutzt, um

- die Steuerung des Entwicklungsprozesses,
- die strukturierte Dokumentation und Bereitstellung von Projektdaten,
- die Strukturierung und Bereitstellung von Wissen, Methoden, Werkzeugen und der Verlaufsgeschichte in einem Entwicklungsprojekt sowie
- die Kommunikation und Kooperation

zu unterstützen. Die Anwendbarkeit und der Nutzen dieses Modells wurden in einer umfangreichen Studie evaluiert und bestätigt (BLESSING 1994, S. 183ff.).

3.2 Deskriptive Konstruktionsforschung in Deutschland

In Deutschland entwickelte seit Mitte der 1980'er Jahre eine enge Zusammenarbeit zwischen Arbeitsgruppen der Konstruktionsforschung und der kognitiven Psychologie mit dem Ziel, elementare Denk- und Handlungsabläufe beim Entwickeln und Konstruieren genauer zu untersuchen. Dieses sollte zum einen eine bessere Integration denkpsychologischer Erkenntnisse in die Konstruktionsmethodik ermöglichen und zum anderen auch Beiträge zur kognitionspsychologischen Theorie des komplexen Problemlösens liefern.

So untersuchte zunächst Rutz (RUTZ 1985, EHRENSPIEL & RUTZ 1987) ausgehend von einigen grundlegenden Zweifeln an präskriptiven Vorgehensmodellen das Vorgehen zweier Maschinenbaustudenten beim Entwerfen einer Bohrvorrichtung. Dabei beobachtete er, dass die in präskriptiven Vorgehensmodellen postulierten Konstruktionsphasen sich im realen Vorgehen zwar anhand der von den Versuchspersonen gewählten Abstraktionsstufe der Problemrepräsentation, nicht jedoch als zeitlich aufeinander folgende Arbeitsschritte identifizieren lassen. Das reale Vorgehen sei vielmehr stark von Vor- und Rücksprüngen geprägt (Abbildung 3-11).

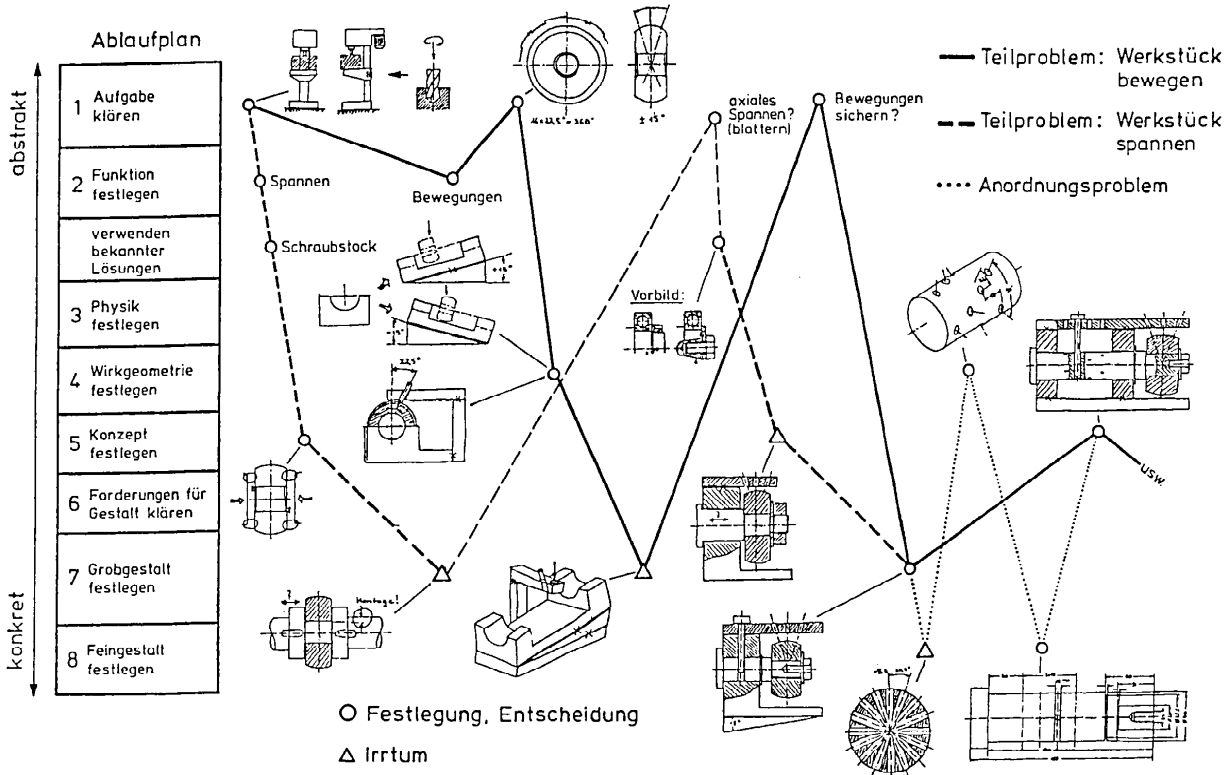


Abbildung 3-11: Iterativer Ablauf der Konzeptgenerierung bis ins Vorentwurfsstadium (RUTZ 1985, S. 143)

„Auffallend sind die Iterationen, die über längere Zeit den Problemlöser immer wieder an den Ausgangspunkt seiner Überlegungen zurückführen. Sie liefern damit immer neue Argumente und Aspekte, die in die Umformulierung und Untergliederung des Problems einfließen. [...] Der Ablauf der Problemlösung läuft deutlich über das Finden der eigentlichen Lösung, das Anpassen an die spezielle Situation, die Einordnung in den Gesamtzusammenhang und die Ablaufkontrollen mit dem Übergang zum nächsten Problem.“ (RUTZ 1985 S. 143) Rutz geht davon aus, dass diese Iterationen Ausdruck eines Grundprinzips menschlichen Problemlöseverhaltens sind, das sich als rekursiver Wechsel von *trial and error* bei gleichzeitigem Wechsel der Abstraktionsebenen der Problemrepräsentation beschreiben lässt. Er greift hier auf das TOTE-Schema (zurückgehend auf MILLER ET AL. 1960) als kognitives Basismodell zurück und setzt dieses mit bewusstem, allgemeinem Problemlöseverhalten und dem übergeordneten Prozessmodell der präskriptiven Konstruktionsmethodik in Beziehung (Abbildung 3-12).

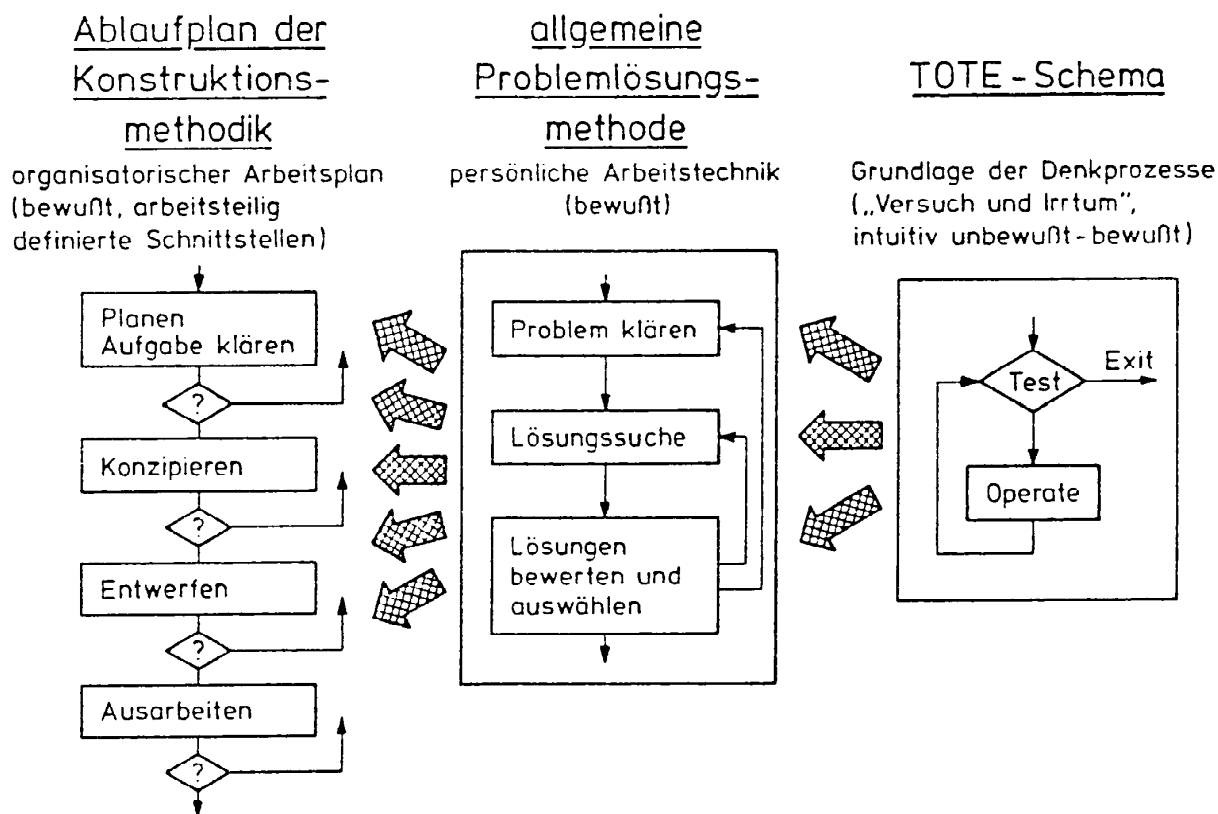


Abbildung 3-12: Zusammenwirken von organisatorischem Ablaufplan, persönlich bewusster Arbeitstechnik und unbewussten Denkprozessen (RUTZ 1985, S. 132)

Rutz stellt zusammenfassend fest, dass lineare Ablaufpläne „irreführend und unvollständig“ seien (RUTZ 1985, S. 155) und lediglich die verschiedenen Abstraktionsniveaus beschreiben, auf denen Konstruktionsprobleme repräsentiert werden. Iteratives Vorgehen sei keine unzulässige Abweichung vom „idealen“ Vorgehensplan sondern zwangsläufiger Ausdruck elementarer kognitiver Prozesse, bei denen das Abstraktionsniveau ständig wechselt.

Dylla untersuchte das Vorgehen von sechs Versuchspersonen (ein Maschinenbaustudent und fünf berufserfahrene Konstrukteure) beim Konstruieren einer Wandhalterung mit Schwenkmechanismus für ein optisches Gerät (DYLLA 1991, EHRENSPIEL & DYLLA 1991, EHRENSPIEL & DYLLA 1993) und erfasste u.a. die zeitliche Verteilung elementarer Konstruktionstätigkeiten (Abbildung 3-13).

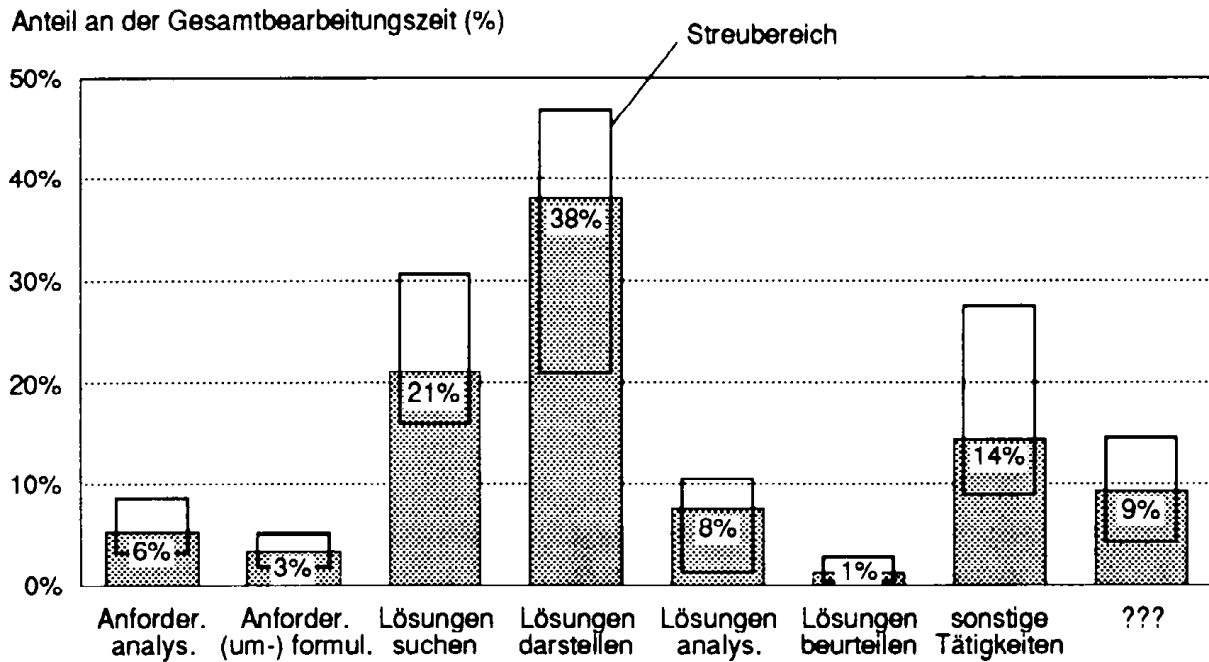


Abbildung 3-13: Mittelwerte der relativen Bearbeitungszeiten für elementare Konstruktionsarbeits-schritte (DYLLA 1991, S. 68)

Es zeigte sich dabei, dass diese Arbeitsschritte nicht linear nacheinander abgearbeitet wurden, sondern dass Vor- und Rücksprünge zu jeder Zeit im Konstruktionsprozess beobachtet werden konnten. So gab es zwar bei allen Versuchspersonen eine deutliche Konzentration auf die Analyse und Umformulierung von Anforderungen am Beginn, alle Versuchspersonen kehrten jedoch im weiteren Verlauf regelmäßig wieder zu diesen frühen Schritten zurück (Abbildung 3-14).

zeitlicher Anteil für Analyse und (Um-) Formulierung der Anforderungen im jeweiligen Intervall (%)

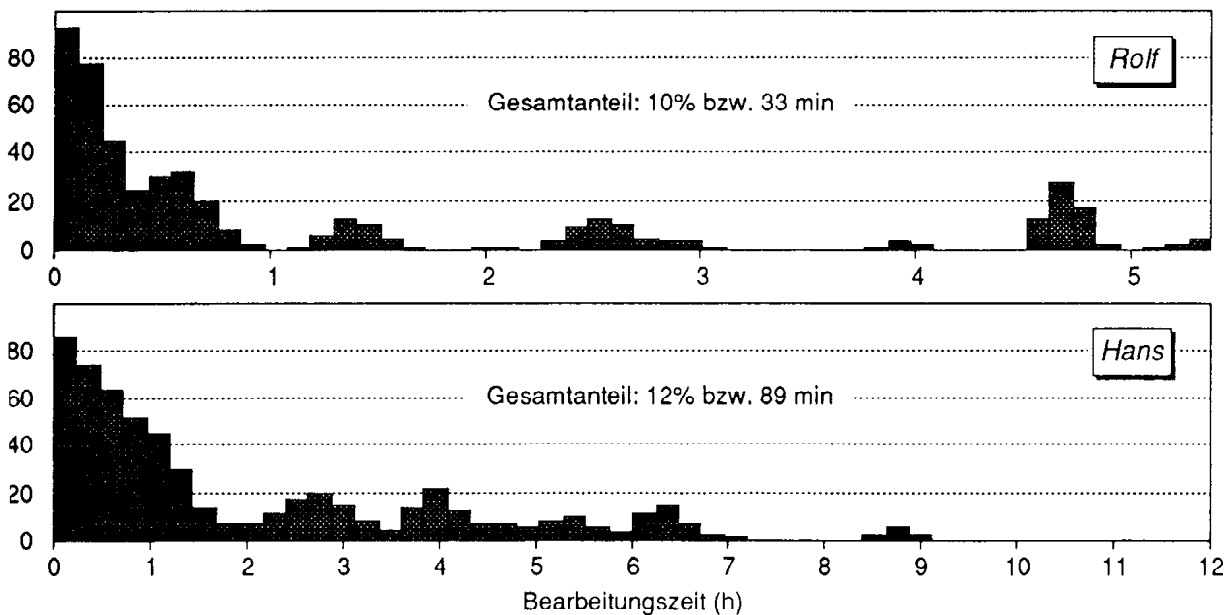


Abbildung 3-14: zeitliche Anteile für Anforderungsanalyse über Gesamtprozessdauer (DYLLA 1991, S. 74, Auszug)

Es wurde dabei eine über den gesamten Prozessverlauf fortschreitende schrittweise Dekomposition und Konkretisierung der Problemstellung und Zieldefinition vorgenommen. Für die Lösungssuche griffen die Versuchspersonen weit überwiegend auf im Gedächtnis gespeicherte Lösungen zurück und benutzten nur in geringem Umfang externe Unterlagen. Dabei wurde zudem überwiegend nach *konkreten* Lösungselementen wie Gestaltelementen, Verbindungselementen oder Normteilen und Halbzeugen gesucht (Abbildung 3-15).

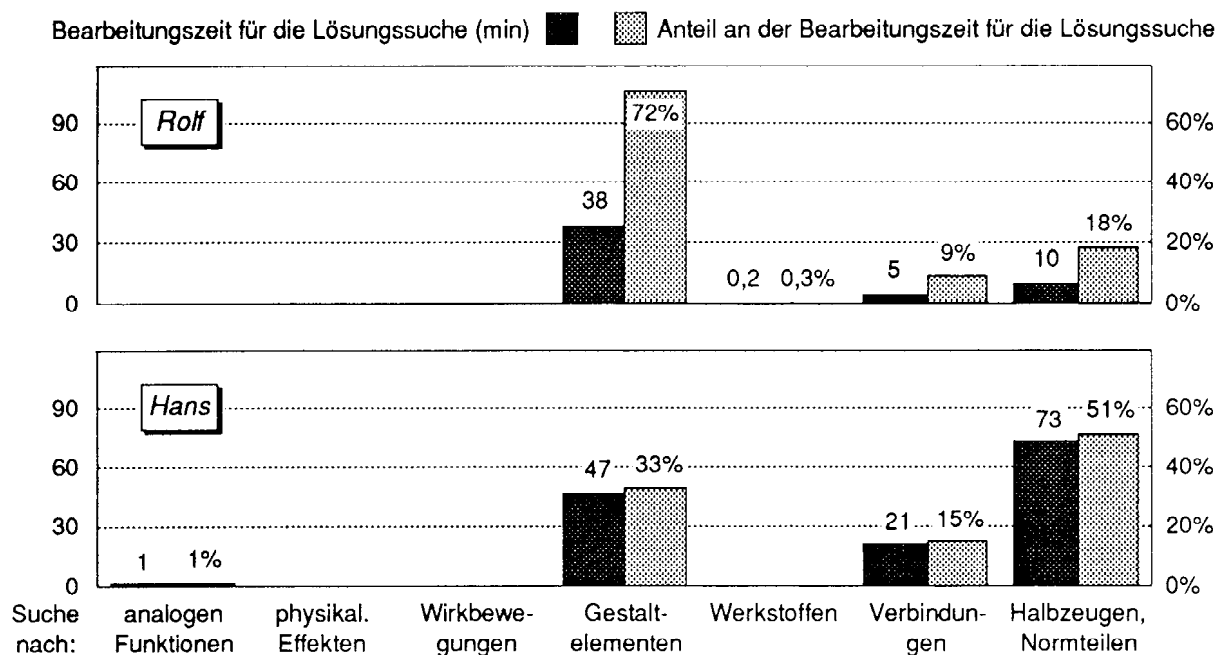


Abbildung 3-15: Arten der Lösungssuche (DYLLA 1991, S. 86, Auszug)

Abstrakte Problem- bzw. Lösungsrepräsentationen wie Funktionen oder Wirkprinzipien wurden dagegen gar nicht oder nur in geringem Umfang zur Lösungssuche eingesetzt. Interessant ist dabei, dass das in der ersten visuellen Lösungskonkretisierung (Konzeptskizze) jeweils realisierte Wirkprinzip für die Hauptfunktion (Schwenkmechanismus) von allen Versuchspersonen bis zum endgültigen Entwurf unverändert beibehalten wurde.

Bei der schrittweisen Lösungskonkretisierung konnten zwei elementare Strategien unterschieden werden, die Dylla als *generierende* und *korrigierende Variation* bezeichnet. Bei der generierenden Variation „[...] werden mehrere, zunächst gleichberechtigte Lösungsvarianten erzeugt, aus denen dann eine Lösung ausgewählt werden muss.“ (DYLLA 1991, S. 95, Abbildung 3-16) Dieses Vorgehen wird in der präskriptiven Konstruktionsmethodik zur Erweiterung des Lösungsraumes und zur Vermeidung von Vorfürerungen regelmäßig empfohlen.

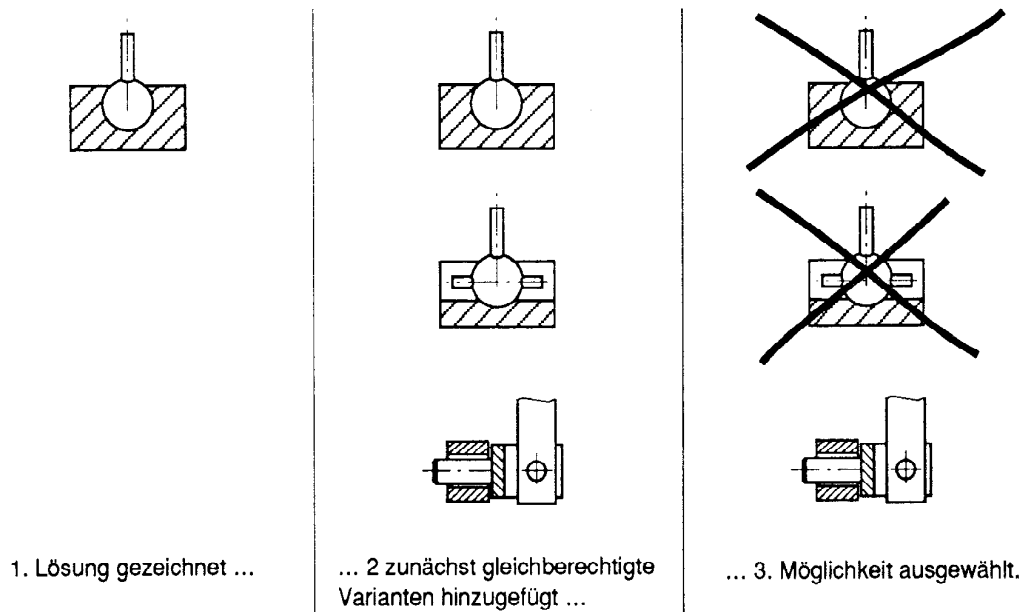


Abbildung 3-16: Beispiel für generierende Variation (DYLLA 1991, S. 95)

Bei der korrigierenden Variation wird zunächst eine Lösungsvariante bis zu einem relativ hohen Konkretisierungsgrad entworfen und daraufhin auf ihre Eignung überprüft. Ergibt diese Überprüfung Mängel, so wird die Lösung entweder korrigiert oder verworfen (Abbildung 3-17).

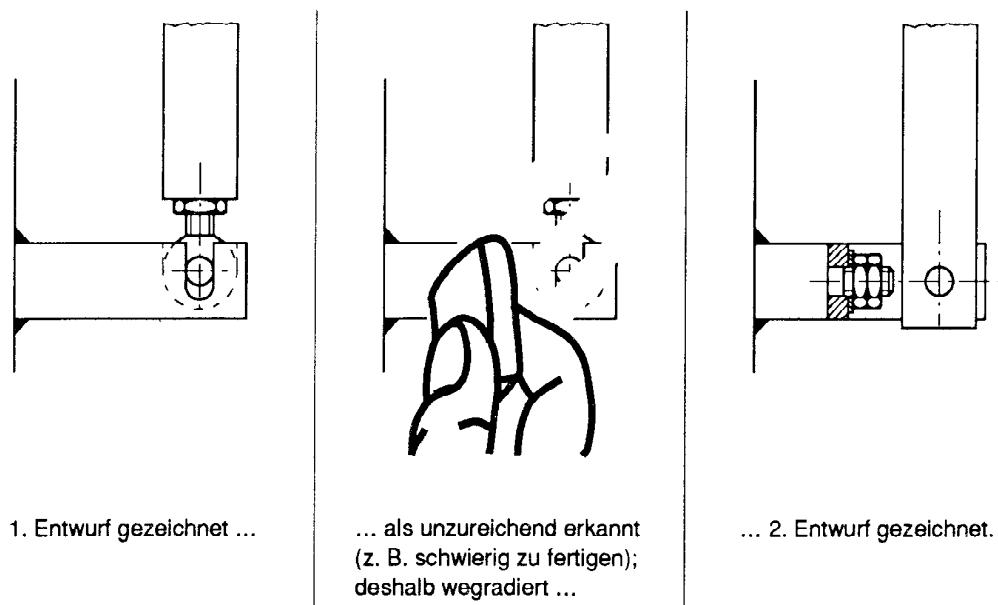


Abbildung 3-17: Beispiel für korrigierende Variation (DYLLA 1991, S. 96)

Obwohl dieses Vorgehen den Empfehlungen der präskriptiven Konstruktionsmethodik widerspricht, überwiegt es in den von Dylla untersuchten Prozessen mit im Mittel 81% aller beobachteten Variationen deutlich (Abbildung 3-18).

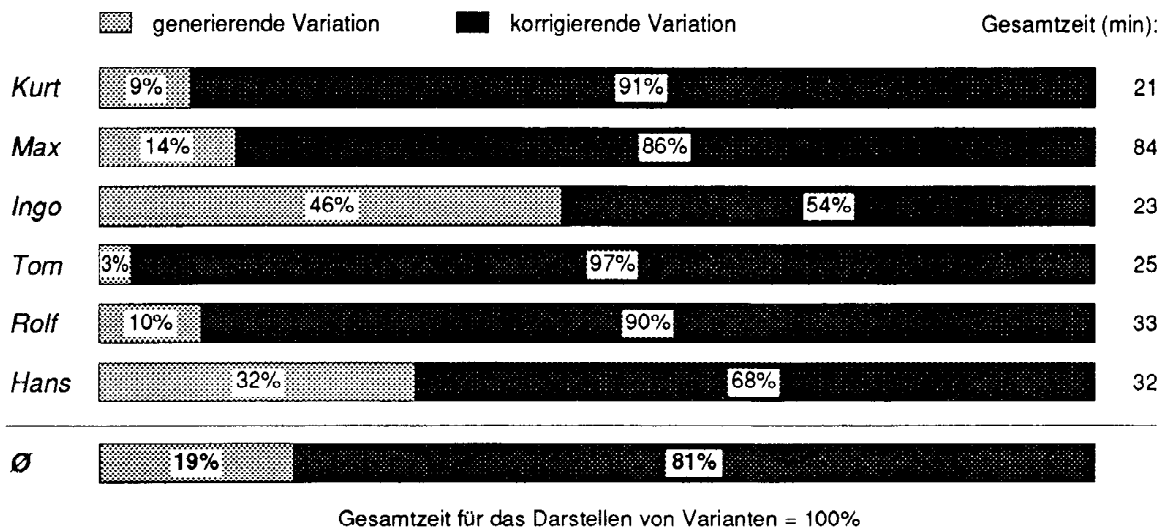


Abbildung 3-18: relative Anteile generierender und korrigierender Variation (DYLLA 1991, S. 96)

Die Beurteilung von Lösungsvarianten erfolgte überwiegend qualitativ und führte oft auf binäre Urteile vom Charakter „geht / geht nicht“. Quantitative Analysen wurden oft nur in Form von Abschätzungen vorgenommen und genaue Berechnungen bildeten den geringsten Anteil (Abbildung 3-19).

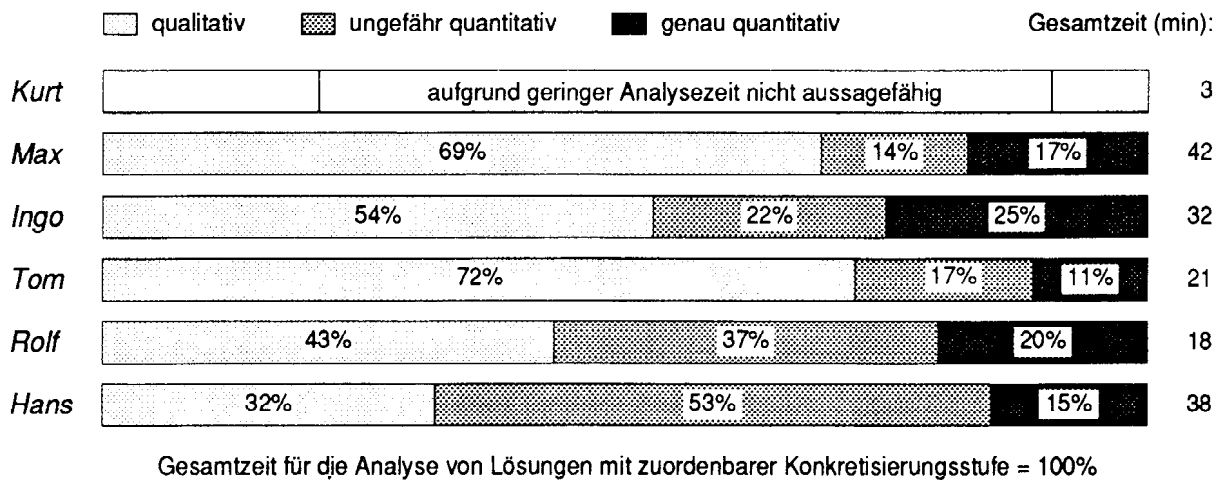


Abbildung 3-19: relative Anteile qualitativer und quantitativer Beurteilungsschritte (DYLLA 1991, S. 100)

Ein Einsatz diskursiver Beurteilungsmethoden konnte bei keiner Versuchsperson beobachtet werden. Einen Einfluss auf die Lösungsgüte hatten unterschiedlichen Ausprägungen von generierender und korrigierender Variation und auch die unterschiedlichen Ausprägungen im Konkretisierungsgrad der Darstellung nicht (vgl. DYLLA 1991, S. 133). Neben diesen Ergebnissen konnte Dylla weiter beobachten, dass zur globalen Steuerung des Entwurfsprozesses *Strategien* eingesetzt wurden, die über die mehrstufige Bildung von Zwischenzielen das Problem in vielen, relativ kleinen Einheiten bzw. Teilproblemen zu einer Gesamtlösung führten. Dabei waren Analyse- und Beurteilungsschritte für die Ablaufsteuerung von großer Bedeutung.

FRICKE beobachtete 26 Konstrukteure (von denen die Hälfte in einer genaueren Untersuchung berücksichtigt wurde) bei der Lösung der gleichen Aufgabenstellung, die auch von Dylla benutzt wurde, jedoch in unterschiedlich präzise formulierten verbalen Einleitungen (Fricke 1993, FRICKE 1996). Dabei konnten psychologische Personenmerkmale identifiziert werden, die den Konstruktionserfolg entscheidend beeinflussten (Abbildung 3-20).

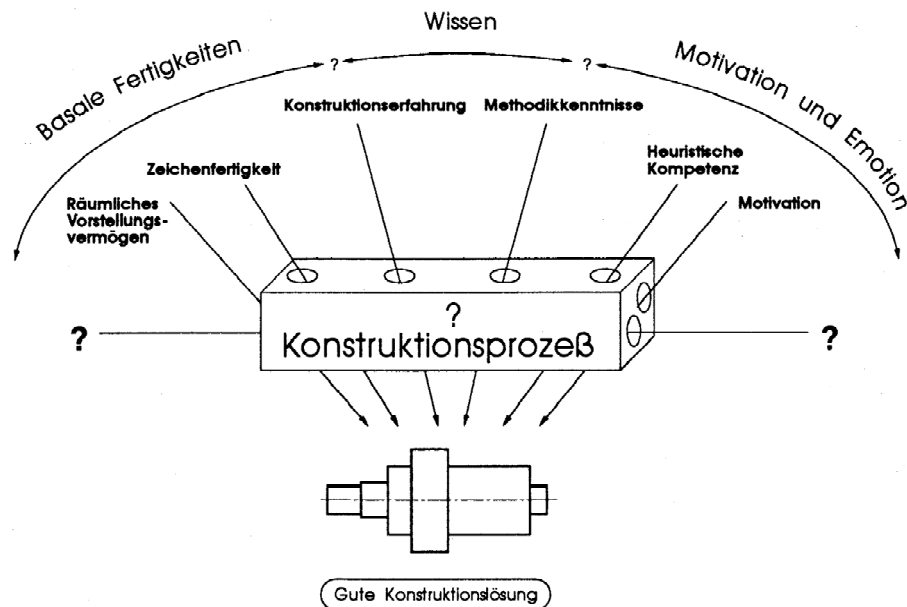


Abbildung 3-20: Erfolgsfaktoren im Konstruktionsprozess (FRICKE 1993, S. 79)

Versuchspersonen, die gute Konstruktionslösungen erzeugten, wiesen demnach

- ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen,
- solides konstruktives Sachwissen und mehrjährige Konstruktionserfahrung sowie
- hohe heuristische Kompetenz¹² (gemessen mit dem Kompetenzfragebogen nach STÄUDEL 1988)

auf. Auch zeichentechnische Fertigkeit, Intelligenzquotient, eine vorab absolvierte konstruktionsmethodische Ausbildung und die individuelle Motivationsstärke hatten einen – wenn auch nur tendenziell – positiven Einfluss auf die Lösungsgüte der Entwürfe (FRICKE 1993, S. 68ff.).

Weiterhin definiert Fricke zwei elementare *Konstruktionsstrategien* für die globale Ablaufsteuerung des Prozesses, die sich vor allem in der Art der Problemdekomposition unterscheiden. Bei der *bereichsorientierten* Konstruktionsstrategie erfolgt die Problem-

¹² Unter *heuristischer Kompetenz* versteht Fricke „[...] die aktuelle Fähigkeit [...], das eigene Vorgehen beim Problemlösen in neuartigen Situationen vorausschauend zu planen, dabei Teilprobleme und ihre Wichtigkeit für das Ganze zu erkennen und das eigene Handeln entsprechend zu steuern und zu kontrollieren.“ (FRICKE 1993, S. 75, vgl. auch v. D. WETH 1994)

dekomposition entlang der Problembereiche des Konstruktionsauftrags (Abbildung 3-21).

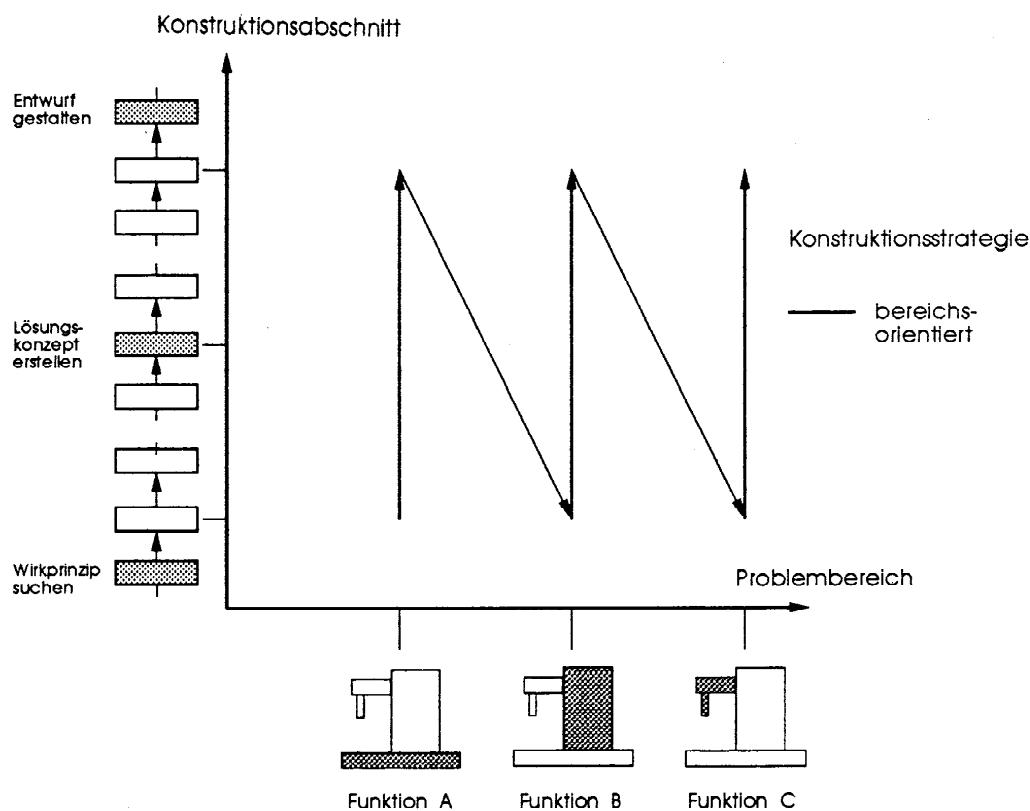


Abbildung 3-21: bereichsorientierte Konstruktionsstrategie (FRICKE 1993, S. 89)

Ein Konstruktionsproblem wird hier funktionsorientiert in Problembereiche zerlegt, die nacheinander über die verschiedenen Abstraktionsstufen einer konkreten Lösung zugeführt werden. Die Integration in eine Gesamtlösung erfolgt dabei erst relativ spät, was zu großen Rücksprüngen im Prozess führen kann.

Die *stufenweise-ablauforientierte* Konstruktionsstrategie folgt den Handlungsempfehlungen der präskriptiven Konstruktionsmethodik und ist gekennzeichnet von einer parallelen Bearbeitung der verschiedenen Problembereiche, dabei stufenweise den Arbeitsschritten und Abstraktionsniveaus des präskriptiven Entwicklungsprozesses folgend (Abbildung 3-22).

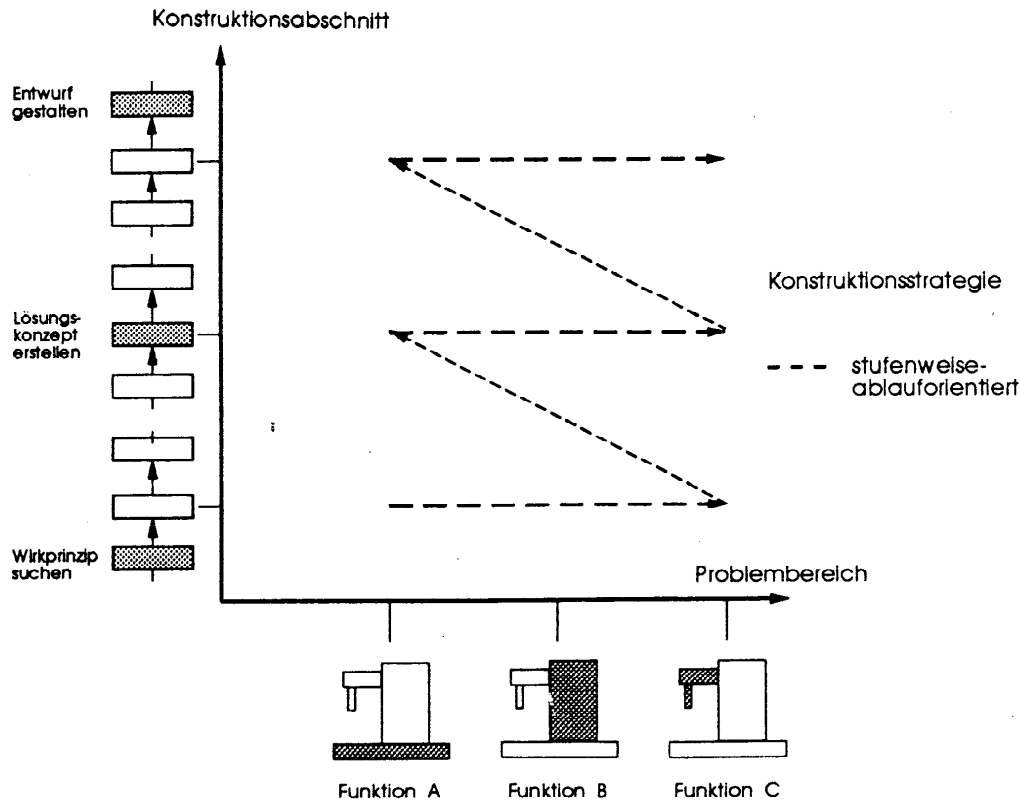


Abbildung 3-22: stufenweise-ablauforientierte Konstruktionsstrategie (FRICKE 1993, S. 89)

Bei dieser Vorgehensweise wird die Integration in eine Gesamtlösung von Beginn an berücksichtigt, so dass größere Rücksprünge vermieden werden können. Fricke konnte in seinen Untersuchungen keine klare Präferenz für eine der beiden Strategien finden, und folgert daraus, dass für den Erfolg einer Konstruktionsstrategie Wissen und Erfahrung entscheidend seien. „Je nach Problem und Personeneigenschaften kann also auch eine gemischt stufenweise-ablauf- und bereichsorientierte Strategie zweckmäßig sein. Aber auch wenn im Ganzen bereichsorientiert vorgegangen wird (also nicht dem methodisch vorgeschlagenen Ablauf folgend), so wird innerhalb der einzelnen Problembereiche dann doch, wie konstruktionsmethodisch empfohlen, stufenweise konkretisiert.“ (FRICKE 1993, S. 90)

Innerhalb dieser Grobklassifizierung von Konstruktionsstrategien fand Fricke außerdem individuelle *Vorgehensstile*, die auch bei stufenweise-ablauforientiert vorgehenden Versuchspersonen durch Abweichungen vom sequentiellen Ablaufmodell der Konstruktionsmethodik gekennzeichnet waren. Ein strikt sprungfreies Vorgehen konnte dabei bei keiner Versuchsperson beobachtet werden. Ein Vorgehen, das bestimmte engere Iterationen innerhalb der einzelnen Konstruktionsphasen gemäß des Vorgehensmodells der Richtlinie VDI 2221 (1986) beinhaltete, konnte bei neun der dreizehn Versuchspersonen identifiziert werden, ohne dass jedoch ein Zusammenhang zum Konstruktionserfolg hergestellt werden konnte. Fricke definierte deshalb ein *flexibel-methodisches* Vorgehen, das einen weit größeren Rahmen von Vor- und Rücksprüngen als zweckmäßig ansieht und ein *unangemessen-methodisches* Vorgehen, das zwar wesentlich dem flexibel-methodischen Vorgehen entspricht, aber zusätzlich zu „erlaubten“ Vor- und Rück-

sprüngen viele weitere unzweckmäßige Vor- und Rücksprünge aufweist. Der flexibel-methodische Vorgehensstil (der bei sechs Versuchspersonen beobachtet werden konnte) erwies sich dabei als der erfolgreichere (FRICKE 1993, S. 100ff.).

Günther untersuchte den Ausbildungseinfluss auf das Vorgehen beim Entwerfen und verglich dabei insgesamt 18 Konstrukteure mit Hochschulabschluss und konstruktionsmethodischer Ausbildung („M-Konstrukteure“) und solche, die ohne Hochschulabschluss und ohne konstruktionsmethodische Ausbildung ihre Kompetenzen in der Berufspraxis erworben hatten („P-Konstrukteure“) (GÜNTHER 1998, GÜNTHER & EHRENSPIEL 1998). Die Versuchspersonen bearbeiteten dabei die gleiche Konstruktionsaufgabe wie in der Studie von DYLLA 1991. Auch in dieser Studie wurden Personenmerkmale identifiziert, die den Konstruktionserfolg entscheidend beeinflussten (Abbildung 3-23).

	Konstruktionserfahrung	Heuristische Kompetenz	Adäquates Problemöseverhalten	Emotionale Belastung	Regression	Resignation	Räumliches Vorstellungsvermögen	Motivation
Güte der Lösung	●●● 0,003	●● 0,054	0,268	●●● ⁻ 0,008	●● ⁻ 0,012	●● ⁻ 0,028	0,177	0,274
Güte der Darstellung	0,172	●● 0,086	0,402	●● ⁻ 0,023	●● ⁻ 0,011	●● ⁻ 0,057	0,291	0,420

Abbildung 3-23: Zusammenhänge zwischen Personenmerkmalen und Lösungsgüte der Konstruktion (GÜNTHER 1998, S. 65)

Dabei zeigte sich wie bei FRICKE 1993, dass Konstruktionserfahrung ein entscheidender Erfolgsfaktor ist. Im Gegensatz zu FRICKE 1993 konnte ein positiver Einfluss des räumlichen Vorstellungsvermögens und der individuellen Motivation jedoch nicht gefunden werden und auch die heuristische Kompetenz wirkte nur tendenziell positiv. Einen deutlich negativen Einfluss hatten dagegen eine hohe emotionale Belastung sowie Personenmerkmale wie eine Neigung zu Regression (Fluchttendenz bei Problemen) und Resignation.

Einzelfallbetrachtungen von sechs P-Konstrukteuren und zwei M-Konstrukteuren ergaben, dass die P-Konstrukteure überwiegend eine Problemdekomposition entlang der Teilprobleme des Auftrags vornahmen und dabei eine schnelle Konkretisierung des Entwurfes für das zuerst bearbeitete Teilproblem anstrebten. Lösungen für weitere Teilprobleme wurden danach an die erste Teillösung angepasst. Beide M-Konstrukteure arbeiteten dagegen deutlich ablauforientiert (Abbildung 3-24).

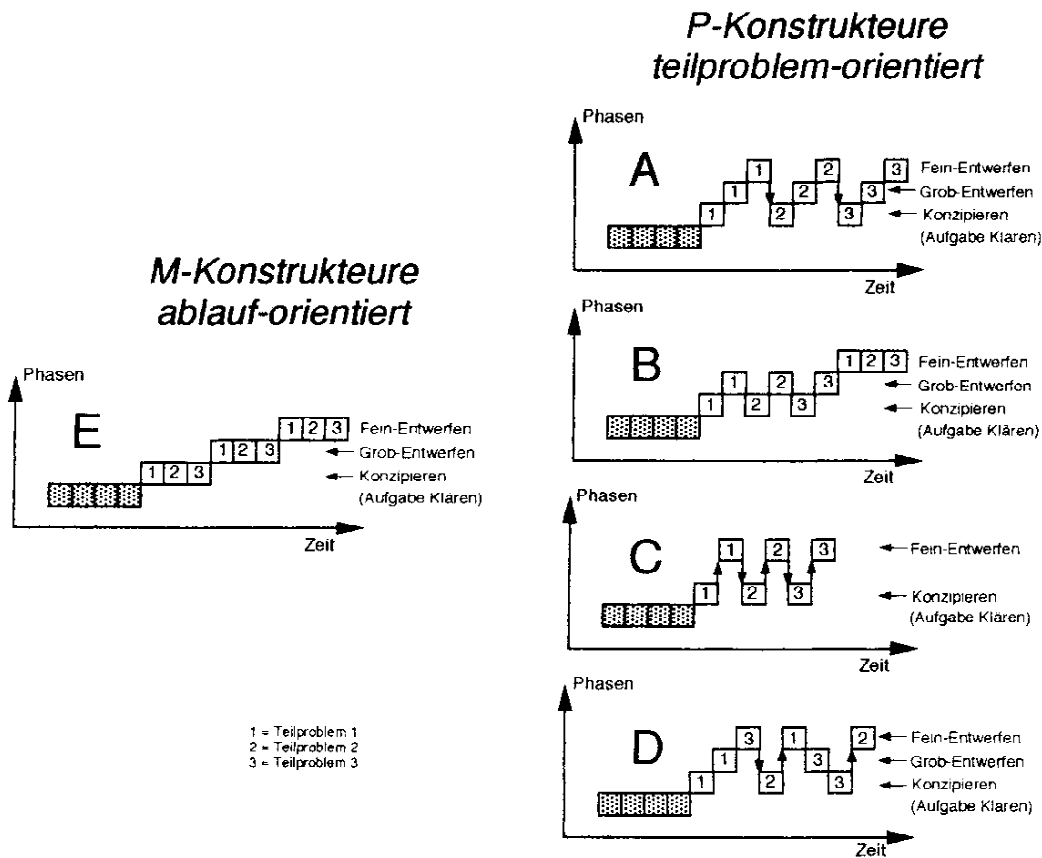


Abbildung 3-24: Beobachtete Vorgehensstile (GÜNTHER 1998, S. 90)

Wie schon DYLLA 1991 konnte Günther einen Überhang korrigierender Variationschritte gegenüber generierenden beobachten, wenn auch weniger ausgeprägt als bei Dylla (59% über alle Versuchspersonen, 65% bei den P-Konstrukteuren) (vgl. GÜNTHER 1998, S. 105). Zusammenfassend stellt Günther fest, dass P-Konstrukteure – also praxis-erfahrene Konstrukteure ohne Hochschulausbildung (GÜNTHER 1998, S. 130f.)

- überwiegend teilproblem-orientiert vorgehen;
- zunächst nur eine vorläufige Problemklärung vornehmen und diese danach schrittweise anhand konkreter Lösungen verfeinern;
- während des gesamten Prozesses immer wieder in kurzen Abschnitten in die Konzeptphase zurückkehren;
- relativ viel Zeit auf Entwurfstätigkeiten verwenden;
- nur eine geringe Zahl von Varianten verfolgen und dabei die korrigierende Variation bevorzugen;
- keine expliziten Bewertungsverfahren einsetzen und
- neben der direkten Dokumentation des Entwurfes (Zeichnung, Stückliste) kaum weitere Dokumente erstellen.

Diese Erkenntnisse münden in eine – stark an die präskriptive Konstruktionsmethodik angelehnte – Leitlinie zur Unterstützung von P-Konstrukteuren, die durch die Vorgabe

zwingend zu dokumentierender Arbeitsergebnisse für alle Phasen des Konstruktionsprozesses Konstruktionsrisiken, die aus unzureichenden Aufgabenklärung und zu frühen Konkretisierung resultieren können, mindern soll (GÜNTHER 1998, S. 136ff.).

RÜCKERT untersuchte in einer Laborstudie das Vorgehen von 13 berufserfahrenen und konstruktionsmethodisch ausgebildeten Konstrukteuren bei der Bearbeitung einer Entwurfsaufgabe aus dem Bereich des Maschinenbaus. Dabei sollte eine Untersuchungsgruppe (sieben Versuchspersonen) die Aufgabe mit konventionellen Hilfsmitteln am Zeichenbrett bearbeiten. Die andere Gruppe (sechs Versuchspersonen) bearbeitete die Aufgabe unter Benutzung des als Prototyp entwickelten Konstruktionsleitsystems KALEIT (vgl. z.B. FELDHUSEN 1989, BEITZ 1990), das auf der Basis des Prozessmodells gemäß der Richtlinie VDI 2221 (1986) das Vorgehen steuerte. Beide Gruppen wurden außerdem aufgefordert, konstruktionsmethodisch vorzugehen.

In einer anschließenden Feldstudie untersuchte Rückert zudem den Einfluss konstruktionsmethodischer Anleitung während des Entwicklungsprozesses auf das Vorgehen und den Konstruktionserfolg bei studentischen Projektarbeitsgruppen (RÜCKERT 1997, RÜCKERT ET AL. 1997, RÜCKERT ET AL. 1997B).

In der Laborstudie wurde die Aufforderung, konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen zu folgen, von den meisten Versuchspersonen zwar überwiegend befolgt, es wurden jedoch einige charakteristische Abweichungen beobachtet (RÜCKERT 1997, S. 70):

- Die Arbeitsschritte *Auswählen* und *Bewerten* wurden ausgelassen bzw. wurden nur implizit ausgeführt.
- Die Konzeptphase wurde nur auf abstraktem Niveau bearbeitet.
- Lösungen wurden vorgeifend konkretisiert.
- Die Konzeptphase fehlt ganz.

Dabei erzielten alle Versuchspersonen, die Lösungsideen vorgeifend konkretisierten, eine hohe Ergebnisqualität, während Versuchspersonen mit rein abstrakter Konzeptfindung nur eine niedrige Ergebnisqualität erreichten. Rückert folgert daraus: „Das frühzeitige Konkretisieren von Lösungsvarianten hat den Vorteil, dass der Konstrukteur die Vor- und Nachteile einer Lösung besser abschätzen kann als an abstrakteren Lösungsvorstellungen. Nachteilig ist allerdings, dass das Konkretisieren von möglicherweise am Ende doch verworfenen Lösungen Zeit kostet. Unter Umständen wird diese Vorgehensweise nur dann angewendet, wenn sich der Konstrukteur sicher ist, eine gute Lösung gefunden zu haben, so dass hier das frühzeitige Konkretisieren eher Folge einer erfolgreichen Konstruktionsarbeit und nicht ihre Ursache ist.“ (RÜCKERT 1997, S. 70) Rückert konnte beobachten, dass korrigierende Lösungsvariation gegenüber generierender deutlich überwog und das die Anfertigung konkretisierender Skizzen dabei das wichtigste Hilfsmittel war. (RÜCKERT 1997, S. 78f.) Entgegen den Erwartungen fertigten dabei die Versuchspersonen, die rechnergestützt arbeiteten, häufiger Skizzen an als die konventionell arbeitenden. „Dies steht im Widerspruch zum Ziel der Rechnerunterstützung durch

KALEIT. [...] Das Arbeiten mit konventionellen Hilfsmitteln wie Papier und Bleistift ist eigentlich nur in Ausnahmefällen notwendig, die rechnergestützten Versuchspersonen hätten demnach gar keine oder zumindest weniger Papierskizzen erstellen sollen.“ (RÜCKERT 1997, S. 46)

In der Feldstudie, in der das Vorgehen und der Konstruktionserfolg von neun studentischen Projektarbeitsgruppen mit insgesamt 45 Studierenden der Fachrichtung Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen beobachtet wurde, sollte der Einfluss konstruktionsmethodischer Anleitung während der Projektbearbeitung untersucht werden. Alle Versuchspersonen hatten die Vorlesung *Methodisches Konstruieren* gehört und hatten somit eine erste explizit-deklarative Vermittlung von Vorgehensempfehlungen der Konstruktionsmethodik erfahren. Anschließend sollten sie in Gruppenarbeit ein Konstruktionsprojekt von der Aufgabenklärung bis zum endgültigen Entwurf bearbeiten. Vier Untersuchungsgruppen wurden dabei fortlaufend angehalten, dem konstruktionsmethodischen Vorgehensplan strikt zu folgen („KM angeleitet“), drei Gruppen wurden in einem zweitägigen Workshop mit grundlegenden Techniken der Teamarbeit und des Projektmanagements vertraut gemacht und konnten danach ihr Vorgehen und den Einsatz konstruktionsmethodischer Strategien und Hilfsmittel selbst bestimmen („KM-selbstbestimmt“). Zwei weitere Gruppen wurden in konstruktionsmethodischer Hinsicht gar nicht angeleitet („ohne KMA“). Rückert stellte dabei fest, dass alle angeleiteten Gruppen erwartungsgemäß dem Vorgehensplan strikt folgten, während dies sonst nur noch auf eine KM-selbstbestimmte Gruppe zutraf. Alle übrigen Gruppen wählten ein flexibleres Vorgehen. In Bezug auf den erzielten Konstruktionserfolg schnitten die KM-angeleiteten Gruppen signifikant schlechter ab als die KM-selbstbestimmten. Selbst die beiden Gruppen ohne konstruktionsmethodische Anleitung erzielten bessere Ergebnisse als die KM-angeleiteten¹³ (Abbildung 3-25).

¹³ Dieses Ergebnis ist jedoch interpretationsbedürftig: Eine der KM-angeleiteten Gruppen startete zunächst ohne methodische Anleitung, scheiterte dabei jedoch vollständig, so dass in der Folge eine KM-Anleitung aufgenommen wurde, um das Projekt zu retten (vgl. RÜCKERT 1997, S. 101). Man könnte deshalb spekulieren, dass ein Verzicht auf methodische Anleitung und explizit methodisches Vorgehen zwar schneller zu Lösungen, die dann in der Folge optimiert werden können, führen kann, gleichzeitig aber auch ein hohes Misserfolgrisiko beinhaltet (vgl. Kapitel 6.1).

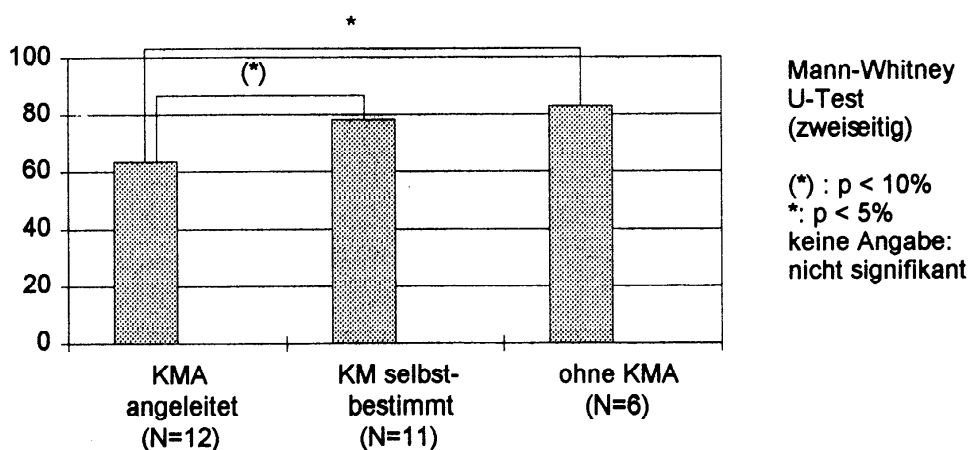


Abbildung 3-25: Lösungsgüte der Entwurfsergebnisse (RÜCKERT 1997, S. 132)

Zum Teil deutliche Unterschiede konnten bei der Akzeptanz der Ausführung konkreter Teilarbeitsschritte des konstruktionsmethodischen Vorgehens und des damit korrelierenden Methodeneinsatzes identifiziert werden. KM-selbstbestimmte Gruppen und Gruppen ohne konstruktionsmethodische Anleitung wiesen hier gegenüber KM-angeleiteten Gruppen insbesondere für Tätigkeiten aus den frühen Phasen der Aufgabenklärung, Anforderungsformulierung und Lösungssuche deutlich höhere Werte auf (Abbildung 3-26). Interessant ist dabei, dass die Gruppe der KM-angeleiteten Studierenden aus dem Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen, die über deutlich geringere Konstruktionserfahrung im Vergleich zu den Versuchspersonen aus dem Studiengang Maschinenbau verfügten, die Nützlichkeit konstruktionsmethodischer Teilarbeitsschritte sehr hoch bewerteten. Die Interpretation liegt nahe, dass die Konstruktionsmethodik eher fachfremden „Quereinsteigern“ eine gute Orientierung bieten kann.

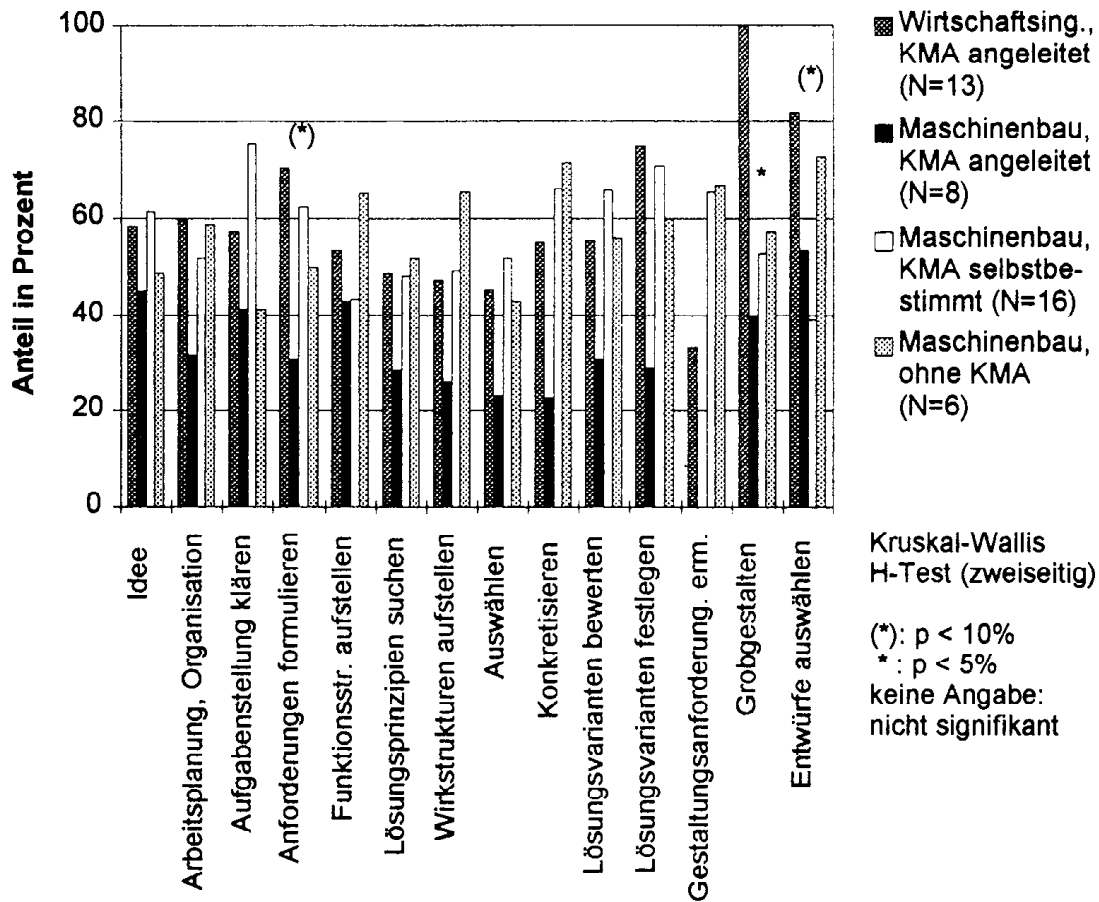


Abbildung 3-26: Bewertung von Tätigkeiten als „nützlich“ in Abhängigkeit von der Ausbildungsart (RÜCKERT 1997, S. 124)

In einer gegenüberstellenden Betrachtung beider Studien kommt Rückert zu dem Schluss, dass abweichend von den Handlungsempfehlungen der Konstruktionsmethodik ein global *iterativ-lösungsorientiertes* Vorgehen mit früher Lösungskonkretisierung, bei dem jedoch lokal flexibel und angepasst an die Problemstellung auch ablaufforientiert und unter paralleler Verfolgung mehrerer Lösungen vorgegangen werden kann, Vorteile bietet (Abbildung 3-27).

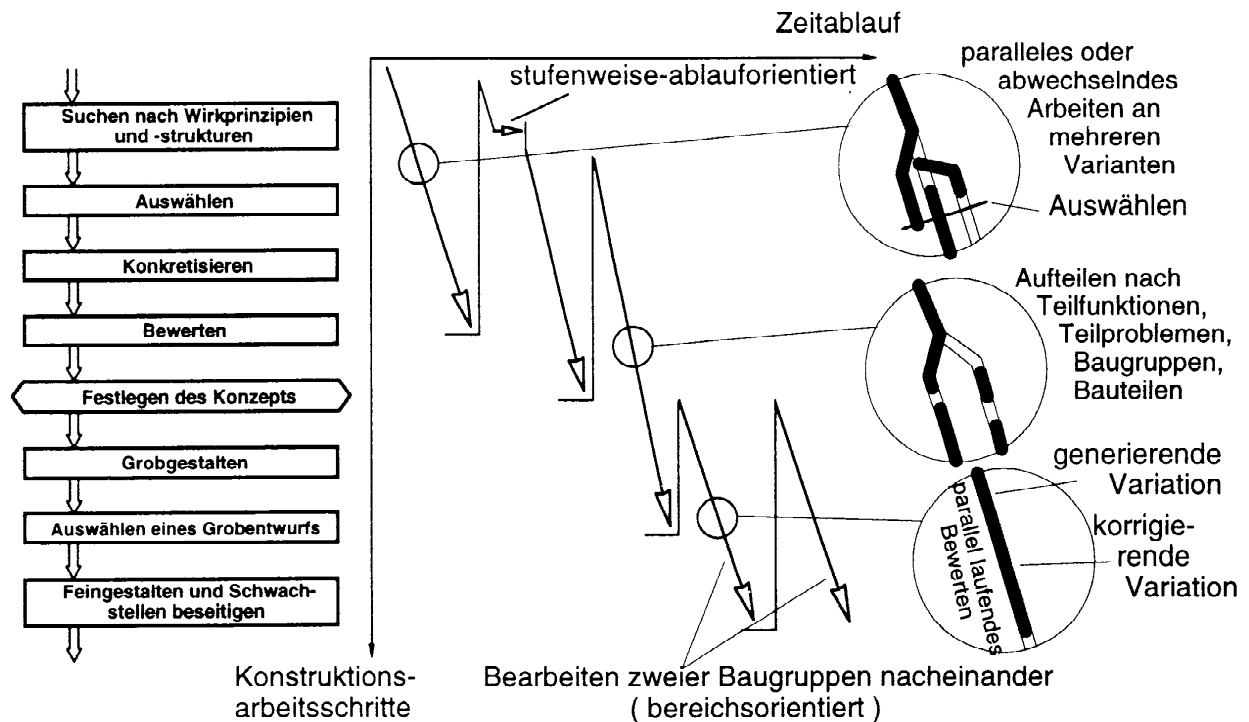


Abbildung 3-27: Flexible Kombination verschiedener Vorgehensweisen (RÜCKERT 1997, S. 141)

Als wichtige Schlussfolgerung aus dem höheren Konstruktionserfolg der KM-selbstbestimmten Untersuchungsgruppen betont Rückert, dass sich in ein solches *flexibel-lösungsorientiertes* Vorgehen nicht nur auf die Ablaufsteuerung beschränken sollte, sondern auch für den Einsatz von Konstruktionsmethoden günstig sei. „Ebenso flexibel wie die Strukturierung des Konstruktionsprozesses sollte auch die Anwendung von Konstruktionsmethoden erfolgen. Der Konstrukteur sollte einzelne Methoden problembezogen anwenden. Für den Anwender stellt die Konstruktionsmethodik dann quasi eine Art ‚Werkzeugkasten‘ dar, aus dem der Konstrukteur sich die nötigen Hilfsmittel greift. Auch der konstruktionsmethodische Vorgehensplan kann als Methode (bzw. Werkzeug) betrachtet werden, auf die der Konstrukteur dann zurückgreift, wenn er selbst nicht weiter weiß oder zusätzliche Anregungen benötigt.“ (RÜCKERT 1997, S. 140)

3.3 Zusammenfassung: Merkmale realen Entwurfshandelns

Die empirische Untersuchung von Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen ist aufwändig und schwierig. Als Folge beschränken sich die meisten Arbeiten im Bereich der deskriptiven Konstruktionsforschung auf explorative Fallstudien oder auf Untersuchungen mit einer kleinen Zahl von Versuchspersonen, so dass jeweils gesicherte Aussagen oder gar statistisch signifikante Ergebnisse nicht erzielt werden können. Über die Vielzahl von Untersuchungen hinweg gibt es jedoch auffällige Häufungen, die insgesamt eine Reihe von Aussagen liefern, die heute als gesichert gelten können. Es wurden deshalb einschlägige Arbeiten von 27 Autoren bzw. Autorengruppen, die insgesamt mehr als 35 empirische Feld- und Laborstudien umfassen, auf gemeinsame Aussagen untersucht. Die Auswahl der Arbeiten beschränkte sich dabei auf solche, die das individuelle Vorgehen von Konstrukteuren oder das Vorgehen von Konstruktionsteams in der Kon-

zeptphase und der frühen Entwurfsphase untersuchen. Dabei handelt es sich überwiegend um Arbeiten aus dem Bereich des mechanischen Maschinenbaus (MB, inklusive Verfahrenstechnik), jedoch auch um einzelne aus der Architektur (A) und der Softwareentwicklung (SW), deren Ergebnisse im Zusammenhang dieser Arbeit relevant sind. Auf der Basis dieser vergleichenden Analyse konnten zehn häufig auftauchende Aussagen zum Vorgehen und zur Handlungssteuerung beim Entwickeln und Konstruieren gefunden werden, die als Basis für die Hypothesen dieser Arbeit von Bedeutung sind. Eine Übersicht über die Ergebnisse dieser Analyse liefert Tabelle 3-6. Dabei sind Arbeiten, in denen eine bestimmte Aussage explizit und hervorgehoben – z.B. in detaillierten Vorgehensanalysen oder deskriptiven Vorgehensmodellen – auftaucht mit einem „●“ bezeichnet. Arbeiten, in denen sich die jeweilige Aussage lediglich implizit in der Beschreibung des beobachteten Vorgehens findet, ohne dabei in der weiteren Analyse explizit behandelt zu werden, sind mit „◎“ bezeichnet.

Tabelle 3-6: Ergebnisse deskriptiver Konstruktionsforschung: Merkmale des Entwurfshandelns

Autoren	Branche	Feld / Labor	allg. iterativer Prozessverlauf	vorläufige Problemdekomposition	schrittweise Problem- und Zielklärung	korrigierendes Vorgehen	multimodale Repräsentationen	zufrieden stellende Lösungen	opportunistische Handlungssteuerung	Dynamik	organisationale Einflüsse	Einfluss von Personenmerkmalen
MARPLES 1961	MB	F		●	●	●		●	⊙	⊙	●	
RAMSTRÖM & RHENMAN 1965	MB	F		●	●					●	●	
EASTMAN 1968, EASTMAN 1970	A	L	●		⊙	⊙	●	●	⊙			
AKIN 1979	A	L	⊙		●	●	●		⊙			
BESSANT & McMAHON 1979	MB	F	●							●	●	●
THOMAS & CARROLL 1979, MALHOTRA ET AL. 1980, CARROLL ET AL. 1980	SW	L	●	⊙	●	●		●				
HALES 1987(1991), WALLACE & HALES 1987	MB	F	⊙						⊙	●	●	⊙
STAUFFER ET AL. 1987, STAUFFER & ULLMAN 1988, ULLMAN & DIETTERICH 1987, ULLMAN ET AL. 1988	MB	L	●	●	●	●	●	●	●			
WALDRON ET AL. 1987, WALDRON & WALDRON 1988, WALDRON 1989	MB	L	⊙	●	●				●	⊙		
CURTIS ET AL. 1988	SW	F	●	●	●	⊙				●	●	●
TAKEDA ET AL. 1990	MB	L	●		●			⊙	●			
GUINDON 1990	SW	L	●	●	●	●			●			
VISSER 1990, VISSER 1994, VISSER 1995, VISSER 1996	SW	F/L	●	●	●	●	⊙		●		⊙	●
TANG 1991	MB	L	⊙				●				⊙	⊙
MINNEMAN 1991	MB	L							⊙	⊙	●	●
BLESSING 1991, BLESSING 1994	MB	F	●	●	●				⊙	●	●	●
BAYA 1996, BAYA & LEIFER 1996	MB	L	⊙			⊙	●					
DWARAKANATH 1996	MB	L	⊙	●	●	⊙	●	●			●	
CHRISTIAANS & VENSELAAR 1992, CHRISTIAANS & DORST 1992	MB	L	⊙	⊙			●		⊙			⊙
CROSS & CROSS 1996	MB	L	⊙	●	●		●		●		●	●
RUTZ 1985, EHRENSPIEL & RUTZ 1987	MB	L	●	⊙	⊙		●					
DYLLA 1991, EHRENSPIEL & DYLLA 1991	MB	L	⊙	●	●	●	⊙		⊙			⊙
FRICKE 1993, FRICKE 1996	MB	L	●	⊙	●	⊙			⊙			●
EISENTRAUT & GÜNTHER 1997	MB	L	●	⊙		⊙	●					⊙
GÜNTHER 1998, GÜNTHER & EHRENSPIEL 1998	MB	L	●	●	●	●		⊙				●
FRANKENBERGER 1997	MB	F		⊙	●					●	●	●
RÜCKERT 1997	MB	L/F	●	●	●	●	⊙		●	⊙		

Es wird deutlich, dass sich eine Reihe von Aussagen in sehr vielen Arbeiten wiederfinden, insbesondere solche, die Abweichungen von einem linearen, hierarchisch strukturierten Vorgehen beschreiben. Einige andere Aussagen tauchen dagegen nur bei einigen Autoren auf. Daraus lässt sich jedoch nicht grundsätzlich auf die geringere Bedeutung dieser Aussagen schließen, da dieses z.T. auf unterschiedliche Fokussierungen und Forschungsziele, aber auch auf die jeweilige Forschungsmethodik zurückzuführen ist. So ist es nicht verwunderlich, dass Problemmerkmale wie *Dynamik* oder *organisatorische Einflüsse* auf den Prozess in fast allen Feldstudien beobachtet werden, in den Laborstudien jedoch weit überwiegend nicht, da im Labor die Erzeugung stabiler und reproduzierbarer Randbedingungen ein wesentliches forschungsmethodisches Ziel ist. Eine Übersicht über die Häufigkeit, mit der in den analysierten deskriptiven Arbeiten die oben genannten Kernaussagen zum Vorgehen explizit oder implizit gefunden wurden, liefert Abbildung 3-28.

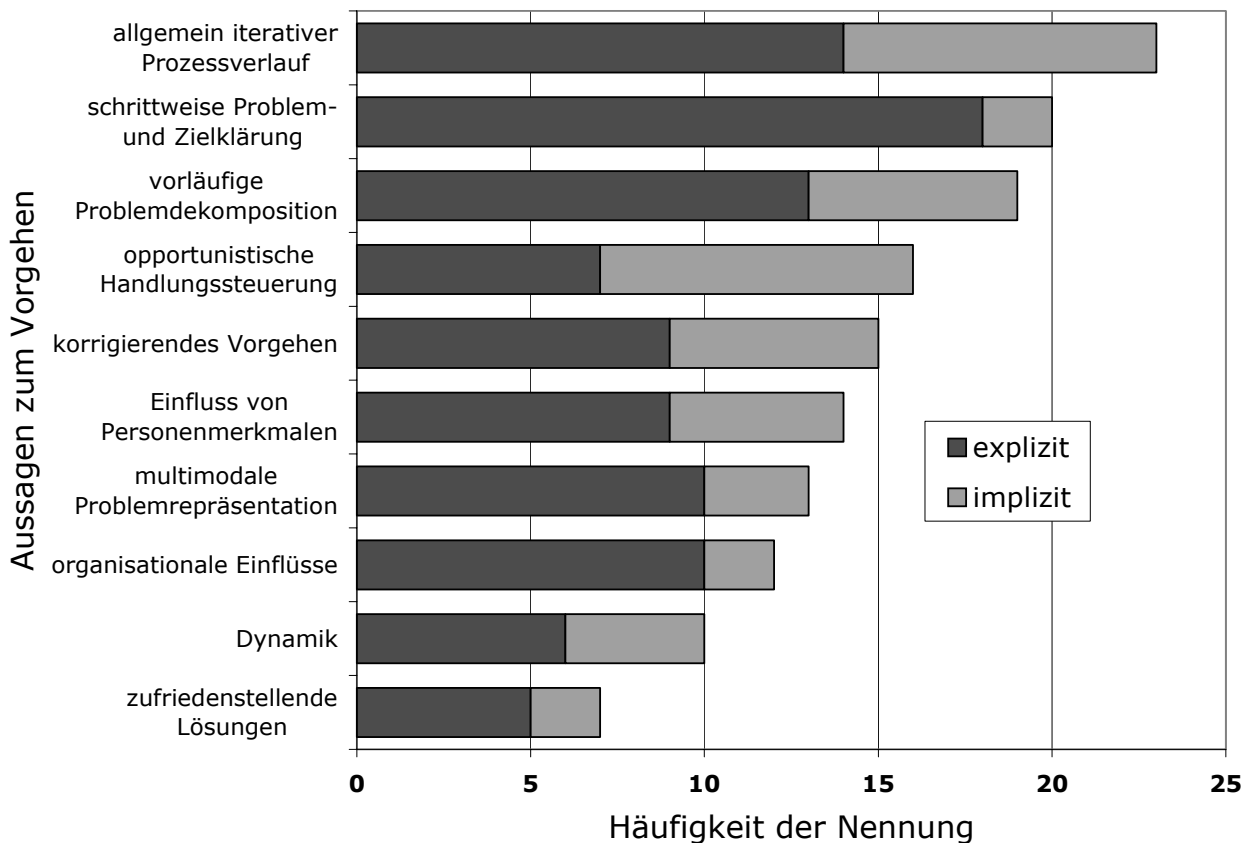


Abbildung 3-28: Häufigkeit von Aussagen zum Entwurfshandeln in der deskriptiven Konstruktionsforschung

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass reale Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse die folgenden Merkmale aufweisen:

- allgemein iterativer Prozessverlauf

Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse laufen in der Regel nicht sequentiell-hierarchisch ab, sondern weisen gemessen an präskriptiven Prozessmodellen Vor- und Rücksprünge auf.

- schrittweise Problem- und Zielklärung

Während des gesamten Prozessverlaufs werden Problem- und Zielklärungsaktivitäten durchgeführt. Diese resultieren aus neuen Erkenntnissen, die bei fortschreitender Lösungskonkretisierung gewonnen werden. Es handelt sich dabei um die Anpassung von Anforderungen und Zielen an einen neuen Wissensstand durch das Fällen von – z.T. kritischen – Entwicklungsentscheidungen auf der Basis von Evaluationsprozessen. Diese beeinflussen die Vorgehensplanung stärker als eine normative Vorgehensplanung.

- vorläufige Problemdekomposition

Eine vollständige Problemdekomposition steht selten am Anfang eines Entwicklungsprozesses. In der Regel wird zunächst nur eine für die Lösung wichtiger Teilprobleme bzw. die Erarbeitung erster Teillösungen hinreichende Problemdekomposition vorgenommen, um eine schnelle Komplexitätsreduktion zu erreichen.

- opportunistische Handlungssteuerung

Das individuelle Vorgehen von erfahrenen Entwicklern und Konstrukteuren kann oft als ein vom in einer konkreten Situation vorhandenen (Erfahrungs-)Wissen gesteuertes, der jeweiligen Situation flexibel angepasstes, „opportunistisches“ Vorgehen charakterisiert werden, bei dem kleinere Handlungsabschnitte (Episoden) gleichwohl hierarchisch strukturiert sein können. Dabei werden aus dem individuellen Wissensvorrat Handlungsalternativen abgerufen und in der jeweiligen Situation Erfolg versprechende und *kognitiv aufwandsarme* Optionen (Opportunitäten) bevorzugt ausgewählt. Im realisierten Vorgehen zeigt sich dies vor allem durch vorgreifende Konkretisierung und assoziative Übertragung von Wissen und Aktivitäten von einem aktuell bearbeiteten (Teil-)Problem auf ein anderes.

- korrigierendes Vorgehen

In realen Konstruktionsprozessen überwiegt eine korrigierende Lösungskonkretisierung auf der Basis einer zügig konkretisierten und im Prozessverlauf relativ stabilen (Teil-)Lösung. Eine generierende, mehrere Lösungen parallel verarbeitende Lösungsvariation, wie sie die präskriptive Konstruktionsmethodik empfiehlt, wird nur selten – und wenn, dann eher in arbeitsteiligen Entwicklungsprozessen als im individuellen Vorgehen – beobachtet.

- Einfluss von Personenmerkmalen

Individuell unterschiedlich ausgeprägte Personenmerkmale wie räumliches Vorstellungsvermögen, heuristische Kompetenz und vor allem Erfahrung beeinflussen das Vorgehen und den Konstruktionserfolg maßgeblich und führen zu individuell unterschiedlichen *Vorgehenstypen* bzw. *Vorgehensstilen*.

- multimodale Repräsentationen

Ein ständiger Wechsel zwischen verschiedenen Arten der – internen wie externen – Problem-, Ziel- und Lösungsrepräsentation, vor allem zwischen visuellen und abstrakt-verbale Repräsentationen (zwischen *Bildern* und *Begriffen*), ist kennzeichnend für

das Vorgehen erfahrener Entwickler und Konstrukteure. Dabei dient dieser Wechsel offenbar nicht nur der Verringerung der mentalen Beanspruchung durch Entlastung des Arbeitsgedächtnisses, sondern ist selbst eine Assoziationen auslösende, kreative Denktivität.

- organisationale Einflüsse

Organisationale Einflüsse wie die Einbindung eines Entwicklungsprozesses in übergeordnete Unternehmens- und Managementprozesse oder die Organisation von Kommunikations- und Kooperationsprozessen – innerhalb eines Entwicklungsteams oder mit anderen Bereichen – beeinflussen das reale Vorgehen maßgeblich und führen zu organisational oder sozial bedingt unterschiedlichen Entwicklungsprozessen.¹⁴

- Dynamik

In realen Entwicklungsprozessen bleiben Anforderungen, Ziele und Randbedingungen über den Prozessverlauf nicht stabil, sondern sind einer ständigen Veränderung unterworfen. Diese Dynamik ist ein wesentlicher Grund für die Notwendigkeit einer ständigen iterativen Problem- und Zielanpassung im Entwicklungsprozess.

- zufrieden stellende Lösungen

In den meisten Fällen wird die schnelle Konkretisierung einer akzeptablen, die Anforderungen zufrieden stellend erfüllenden Lösung angestrebt. Die Entwicklung *optimaler* Lösungen steht in realen Entwicklungsprozessen selten im Vordergrund.

Diese zehn Hauptmerkmale stehen in z.T. deutlichem Widerspruch zu Vorgehensempfehlungen der präskriptiven Konstruktionsmethodik. Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Klärung der Frage, ob es sich hier lediglich um die deskriptive Dokumentation gebräuchlicher Vorgehensweisen handelt, oder ob diese im Vergleich zur Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen auch zu besseren Konstruktionsergebnissen führen.

3.4 Untersuchungsziele und Hypothesen

Aus dem präskriptiven konstruktionsmethodischen Vorgehensmodell und den Ergebnissen der deskriptiven Konstruktionsforschung resultieren Forschungshypothesen für diese Arbeit, die mit den drei Forschungsfragen

- Welchen Einfluss hat eine *konstruktionsmethodische Ausbildung* auf den erzielbaren *Konstruktionserfolg* in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?
- Welchen Einfluss hat eine *konstruktionsmethodische Ausbildung* auf das *tatsächliche Vorgehen* beim Konstruieren in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?
- Welchen Einfluss hat das *tatsächliche Vorgehen* beim Konstruieren auf den erzielbaren *Konstruktionserfolg* in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?

¹⁴ Man kann annehmen, dass hier auch interkulturelle Unterschiede auf individueller, organisationaler und sozialer Ebene wichtige Einflussgrößen darstellen. Diese wurden in den untersuchten Arbeiten jedoch nicht genannt.

korrespondieren (vgl. Kapitel 1.1.2).

Aus diesen Forschungsfragen ergeben sich zunächst folgende Untersuchungsziele für die konkrete empirische Untersuchungsplanung:

- die zuverlässige Dokumentation des beobachteten Vorgehens;
- die zuverlässige Beurteilung und Klassifikation der Lösungsgüte als Maß für den Konstruktionserfolg;
- die zuverlässige Identifikation und Klassifikation von Vorgehenstypen;
- die Korrelation verschiedener Vorgehenstypen mit dem Konstruktionserfolg.

Für eine solche Analyse komplexer Handlungssituationen stehen zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze zur Verfügung:

- der *hypothesegeleitete* Ansatz, bei dem aufbauend auf theoretischen Überlegungen Vorgehenstypen vorab hypothetisch definiert werden, so dass ein beobachtetes Vorgehen diesen zugeordnet werden kann;
- ein stärker *datengeleiteter* Ansatz, bei dem ein Vorgehen zunächst empirisch beobachtet wird, um es anschließend anhand beobachteter charakteristischer Merkmale zu analysieren und zu kategorisieren.

Allerdings besteht auch bei einem datengeleiteten Ansatz die Notwendigkeit hypothetischer Vorfestlegungen, ohne die eine Dokumentation der Beobachtungen nicht möglich wäre.¹⁵ Diese Vorfestlegungen beinhalten z.B. Begriffssysteme, mit deren Hilfe das Beobachtete beschrieben werden kann. Im Falle der Handlungsanalyse in der Konstruktionsforschung sind dies mindestens die hypothetisch zu erwartenden Tätigkeiten bzw. „Basisoperationen“, die beim Bearbeiten eines Konstruktionsauftrags vermutlich durchgeführt werden. Der hypothesegeleitete Ansatz enthält zusätzlich üblicherweise eine Vorstrukturierung dieser Schritte zu hypothetischen Vorgehensabläufen. Ohne Festlegung von elementaren Konstruktionstätigkeiten, deren Auftreten bei der Bearbeitung eines Konstruktionsauftrags erwartet wird, fehlt buchstäblich das Begriffssystem, eine *Sprache*, in der Beobachtungen über das Vorgehen überhaupt formuliert werden könnten.

In der vorliegenden Arbeit wird ein hypothesegeleiteter Ansatz verfolgt, bei dem aufbauend auf dem präskriptiven konstruktionsmethodischen Vorgehensmodell zu erwartende Basisoperationen für die Konzept- und die Vorentwurfsphase vorab definiert werden. Für diese hypothetische Grundfestlegung werden hier entsprechend der Vorgehensleitlinie nach PAHL & BEITZ 1997 elementare Arbeitsschritte und Konstruktionstätig-

¹⁵ Dieses wird von Vertretern der qualitativen Sozialforschung z.T. bestritten, insbesondere von solchen, die einen „ethnographischen“ Ansatz auf die komplexe Handlungsbeobachtung übertragen. Nach Überzeugung des Autors kann gleichwohl keine Beobachtung eines Sachverhalts ernsthaft ohne vorherige Bildung von Begriffen, Modellvorstellungen und Annahmen erfolgen.

keiten zugrunde gelegt. Diesen Ansatz verfolgen auch andere Autoren (vgl. z.B. HALES 1987(1991), DYLLA 1991, FRICKE 1993, GÜNTHER 1998).

Aus den Ergebnissen der deskriptiven empirischen Konstruktionsforschung wurden außerdem hypothetische Vorgehenstypen für das Vorgehen in der Vorentwurfsphase definiert. Beides zusammen mündet in eine hypothetische Prozessmodellierung, die der Überprüfung im Experiment zugänglich ist.

3.4.1 Prozessmodellierung für die Konzeptphase

“Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, der [...] die prinzipielle Lösung (Lösungsprinzip) festlegt. Das Konzipieren ist die *prinzipielle Festlegung* einer Lösung.” (PAHL & BEITZ 1997, S. 176) Als Eingangsinformation für die Konzeptphase muss eine Produktdefinition vorliegen, die jedoch mindestens in Teilen noch schwach definiert sein kann. Das Ziel sind mindestens ein, ggf. mehrere prinzipielle Lösungskonzepte, die die Anforderungen der Produktdefinition zu erfüllen in der Lage sind. Eine sinnvolle Untergliederung dieser Produktentwicklungsphase in Hauptarbeitsschritte bzw. Teilphasen ergibt sich aus den kognitiven Teilschritten des Problemlösens, nämlich (vgl. auch Abbildung 2-18, S. 36)

- Information,
- Definition,
- Kreation,
- Beurteilung,
- Entscheidung,

die in dieser Phase im Mittelpunkt stehen. Die Konstruktionsmethodik ordnet diesen Teilphasen elementare Einzelarbeitsschritte zu (Abbildung 3-29).

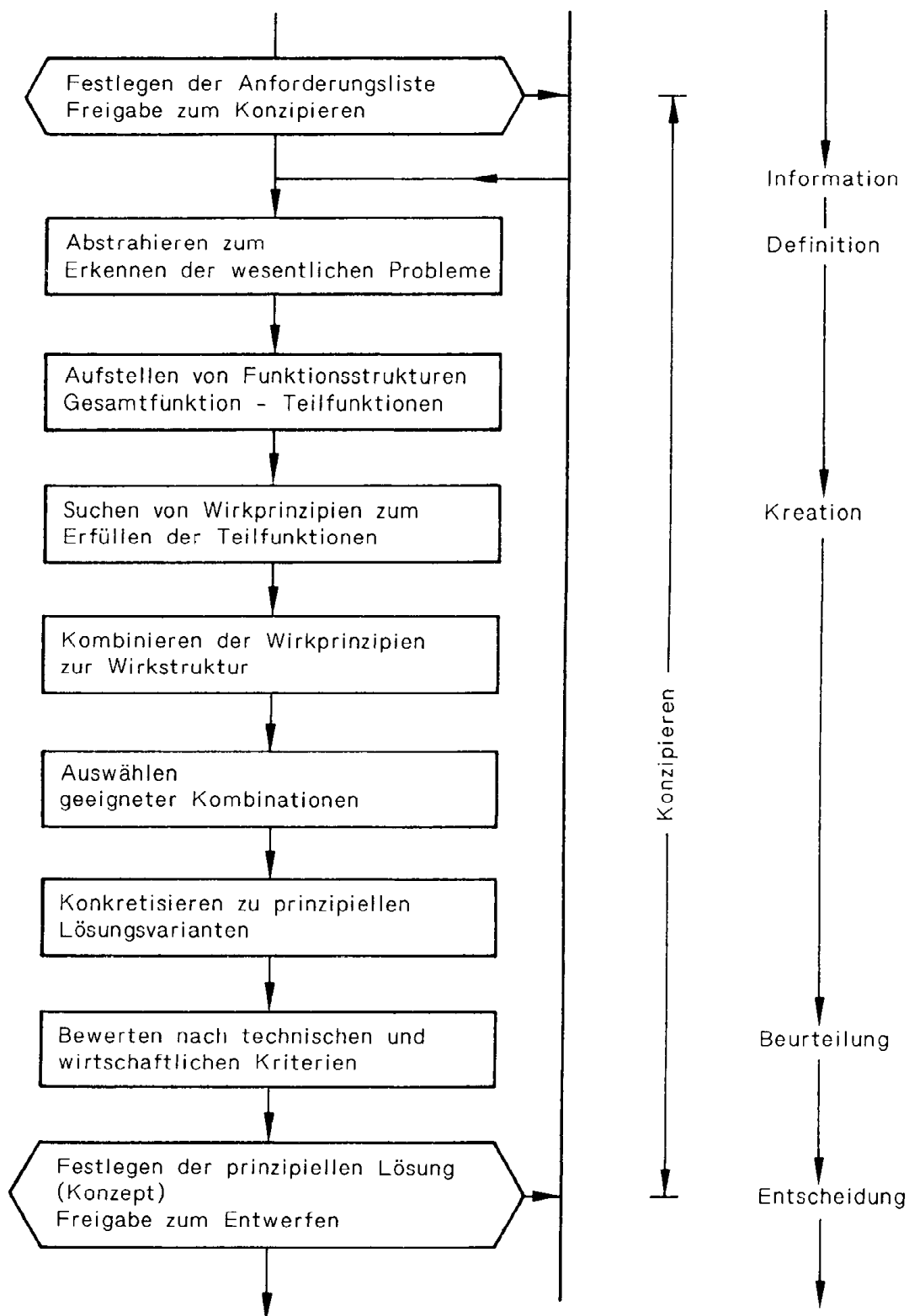


Abbildung 3-29: Vorgehensmodell für die Konzeptphase (PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 204)

Für die vorliegende Arbeit wurde dieses Vorgehensmodell an die konkrete Laborsituation und die in der Laborstudie eingesetzten Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase (vgl. Kapitel 4.1.4.1) angepasst (Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: Hypothetische Basisoperationen für die Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Problemlöseschritt	hypothetische Basisoperationen
Information	– Aufgabenstellung klären, Anforderungen formulieren
Definition	– Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme – Aufstellen von Funktionsstrukturen (Gesamtfunktion / Teilfunktionen)
Kreation	– Suchen nach Wirkprinzipien für Teilfunktionen – Kombinieren von Wirkprinzipien zu prinzipiellen Lösungsvarianten / Wirkstrukturen – Lösungsvarianten darstellen (Skizzieren / Grobgestalten) – Lösungsvarianten vorläufig beurteilen und auswählen – Lösungsvarianten konkretisieren/ überarbeiten
Beurteilung/ Entscheidung	– Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien – Festlegen der prinzipiellen Lösung (Konzept)

Die so definierten Basisoperationen wurden in Erfassungsbögen zur Vorgehensanalyse in der Konzeptphase operationalisiert (vgl. Kapitel 4.3.1).

3.4.2 Prozessmodellierung für die Vorentwurfsphase

„Unter Entwerfen wird der Teil des Konstruierens verstanden, der [...] die Baustruktur [...] eindeutig und vollständig bearbeitet. Das Ergebnis des Entwerfens ist die gestalterische Festlegung einer Lösung.“ (PAHL & BEITZ 1997, S. 250). Eingangsinformation für diese Phase ist ein prinzipielles Lösungskonzept, das Ziel ist ein zunächst vorläufiger, dann endgültiger Entwurf. In der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der frühen Entwurfsphase, d.h. dem Vorentwurf. Analog zur Konzeptphase schlägt die Konstruktionsmethodik auch hier eine Untergliederung in Teilphasen und Einzelschritte vor (Abbildung 3-30).

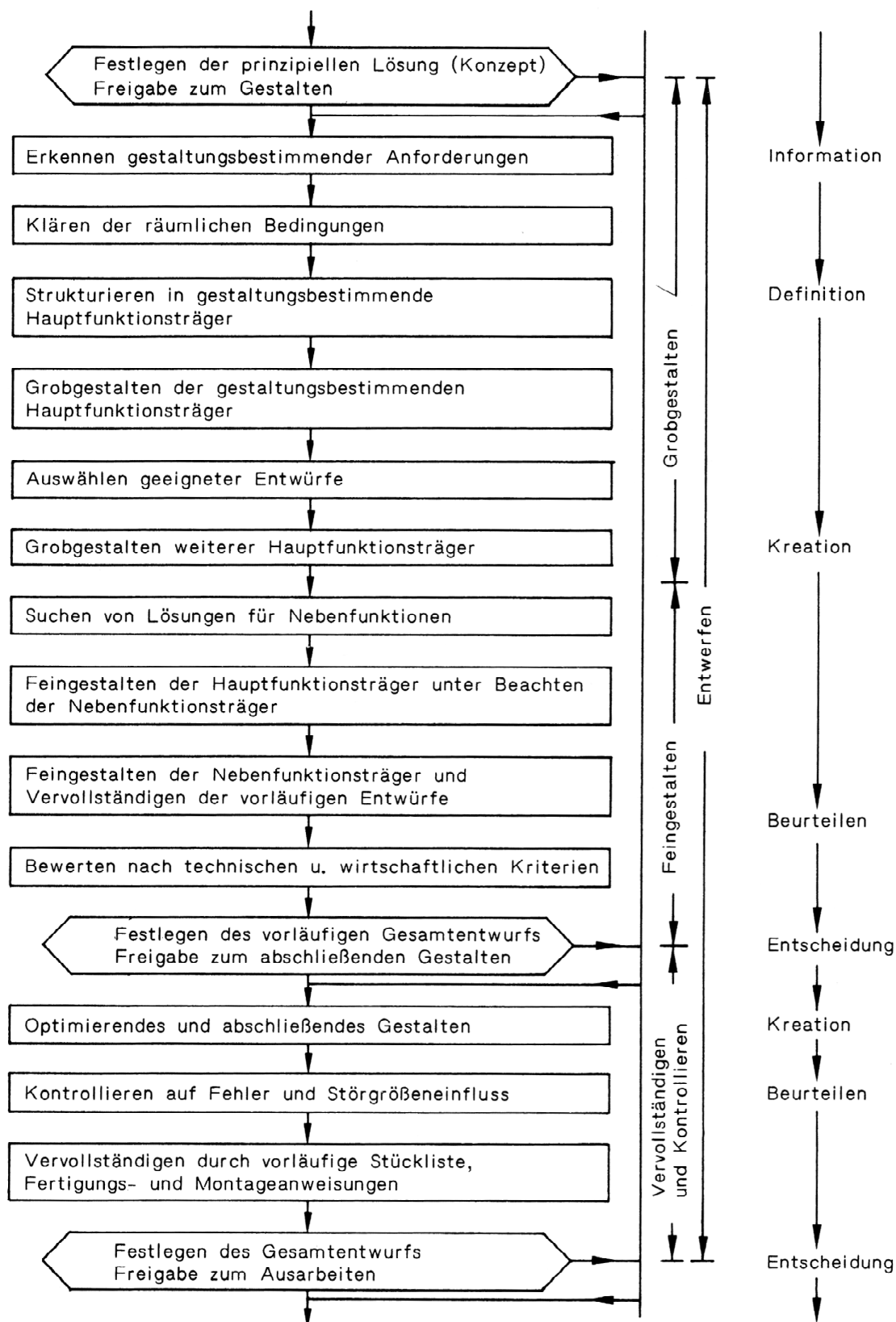


Abbildung 3-30: Vorgehensmodell für die Entwurfsphase (PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 278)

Dieses Vorgehensmodell wurde ebenfalls an den Untersuchungsgegenstand und die konkrete Auftragsformulierung in der Laborstudie (vgl. Kapitel 4.1.4.2) angepasst (Tabelle 3-8). Diese Anpassung bestand vor allem darin, dass für die konkrete Bearbei-

tung der Konstruktionsaufträge aus der Vorentwurfsphase in der Laborstudie erwartet werden konnte, dass die Versuchspersonen zunächst Arbeitsschritte aus der Aufgabenklärungs- und Konzeptphase nachvollziehen mussten, bevor sie mit dem eigentlichen Entwurf beginnen konnten. Entsprechende hypothetische Basisoperationen wurden in das Vorgehensmodell eingefügt.

Tabelle 3-8: Hypothetische Basisoperationen für die Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Teilphase	hypothetische Basisoperationen
Aufgabe klären	– Aufgabenstellung nachvollziehen
Konzipieren	– Wirkstruktur/ Prinzipskizze nachvollziehen
Grobgestalten	– Erkennen gestaltungsbestimmender Anforderungen – Klären der räumlichen Bedingungen – Strukturieren in gestaltungsbestimmende Hauptfunktionsträger – Grobgestalten der gestaltungsbestimmenden Hauptfunktionsträger – Auswählen geeigneter Entwürfe
Feingestalten	– Suchen von Lösungen für Nebenfunktionen – Feingestalten der Haupt- und Nebenfunktionsträger – Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien
Vervollständigen und Kontrollieren	– Optimierendes und abschließendes Gestalten – Kontrollieren auf Fehler – Vervollständigen

Diese Basisoperationen wurden ebenfalls in Erfassungsbögen zur Vorgehensanalyse operationalisiert (vgl. Kapitel 4.3.2).

3.4.3 Hypothetische Vorgehenstypen für die Vorentwurfsphase

Neben dieser Definition von Basisoperationen, mit deren Hilfe das beobachtbare Vorgehen kodiert werden kann, wurden hypothetische Vorgehenstypen definiert, deren Auftreten in der Konzept- und frühen Entwurfsphase zu erwarten ist. Diese gehen vor allem auf die Arbeiten von ULLMAN ET AL. 1988, GUINDON 1990, VISSER 1994 und HACKER 1999 zurück, die Konzepte der Handlungsregulation in die Interpretation des Vorgehens beim Entwickeln und Konstruieren einbeziehen. Auf diese Weise wurden vier hypothetische Vorgehenstypen definiert:

- hierarchisch-prozessorientiertes Vorgehen

Ein solches Vorgehen folgt strikt den Vorgehensempfehlungen der Konstruktionsmethodik nach PAHL & BEITZ 1997 und kann als gleichzeitig schrittweise prozessorientiert und hierarchisch organisiert charakterisiert werden. Das Hauptkriterium für die handlungsleitende Strategie bei der notwendigen Komplexitätsreduktion ist dabei der *Prozess* der schrittweisen und parallelen Lösungskonkretisierung. Dabei tritt eine hierarchische Dekomposition des Auftrags entlang des Prozessfortschritts, verbunden mit einer

schrittweisen Zielerreichung für das gesamte zu entwickelnde Produkt auf. FRICKE 1993 (S. 85ff.) beschreibt diese Vorgehensstrategie als „stufenweise-ablauorientiert“.

- hierarchisch-objektorientiertes Vorgehen

Bei diesem Vorgehenstypus ist die Struktur des zu entwickelnden *Produktes* das entscheidende Merkmal der Problemdekomposition. Ein Konstruktionsauftrag wird hierbei zunächst in Untersysteme (Baugruppen) zerlegt, die – in hierarchischen Episoden – nacheinander bearbeitet werden. Dieses Vorgehen greift zwar auf Handlungsempfehlungen der Konstruktionsmethodik zurück, nutzt diese jedoch vorwiegend lokal für die Steuerung der Bearbeitungsepisoden auf Baugruppenebene und nicht global für die Gesamtaufgabe. Dieses entspricht der von FRICKE 1993 (S. 87ff.) beschriebenen „bereichsorientierten“ Vorgehensstrategie.

- opportunistisch-assoziatives Vorgehen

Dieser Vorgehenstypus ist sehr stark erfahrungswissens- und situationsgeleitet und folgt dem von GUINDON 1990 und VISSER 1994 dargelegten Konzept der opportunistischen Vorgehenssteuerung, bei der in jeder Handlungssituation die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen vor dem Hintergrund des individuellen Vorwissens und konkreter Merkmale der aktuellen Situation bei der Auftragsbearbeitung beurteilt werden und die in dieser Situation erfolgversprechendste Handlungsoption ausgewählt wird. Hierfür wird anfangs nur eine sehr vorläufige Dekomposition der Problemstellung vorgenommen und eine schnelle Lösungskonkretisierung als Basis für eine „korrigierende Variation“ angestrebt (DYLLA 1991 S. 95f.). Dieses geschieht auf der Basis spontaner Assoziationen, die z.B. durch die Erinnerung an frühere Situationen oder durch gerade auf ein anderes Teilproblem erfolgreich angewandte Handlungsoptionen angeregt werden können. Neben der Eignung einer Handlungsoption für die Lösung der konkreten Problemstellung ist dabei die Minimierung des kognitiven Aufwands das entscheidende Kriterium bei der Auswahl einer Handlungsoption.

- rein probierendes Vorgehen

Schließlich ist der kognitionspsychologischen Forschung zur Handlungsregulation auch ein rein probierendes Vorgehen bekannt, das kein methodisches oder strukturiertes Vorgehen erkennen lässt. Es beinhaltet einen mehr oder weniger unsystematischen, häufig wechselnden Umgang mit unterschiedlichen Teilen der Problemstellung, wann immer diese auftauchen oder die Bewusstseinssebene erreichen, und ist deshalb auch als opportunistisches Vorgehen, jedoch ohne *systematische* Zielführung und Problemdekomposition zu charakterisieren. In Fällen der Überforderung mit der Problemlösung kann Entscheidungsvermeidung und das Verlieren in nicht zielführenden Nebenproblemen mit einem solchen Vorgehen verbunden sein. Es ist zu erwarten, dass ein solches Vorgehen vor allem bei unerfahrenen oder überforderten Versuchspersonen beobachtet werden kann.

Es wird erwartet, sämtliche dieser Vorgehenstypen bei der Beobachtung von Versuchspersonen bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

auch identifizieren zu können. Sie bilden eine wesentliche Grundlage für die Formulierung der Forschungshypothesen für das Vorgehen in der frühen Entwurfsphase.

3.4.4 Hypothesen zum Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte

Aufgrund der Überlegungen zum impliziten und expliziten Lernen sowie des Konzeptes des Lernens durch Erfahrung (vgl. Kapitel 2.3.3) kann man davon ausgehen, dass eine nur theoretische Auseinandersetzung mit konstruktionsmethodischen Vorgehensempfehlungen noch nicht zu einer Internalisierung und Prozeduralisierung des mit diesen Vorgehensvorschlägen verbundenen Wissens führt. Das Gelernte wird deshalb auch noch nicht erfolgreich – d.h. mit messbarem Einfluss auf die Arbeitsergebnisse – handlungswirksam. Eine Vertiefung und Erprobung dieses Wissens durch eigene Anwendung auf eine konkrete Problemstellung erlaubt es dagegen, den Kreis des erfahrungsgeleiteten Lernens zu schließen. Dabei kann von einer ersten Internalisierung und Prozeduralisierung ausgegangen werden, so dass dieses Wissen handlungswirksam wird und im Ergebnis die Qualität der Arbeitsergebnisse verbessert. Diese Überlegungen führen zu den folgenden Forschungshypothesen für die erwarteten Einflüsse der konstruktionsmethodischen Ausbildung auf die Lösungsgüte in der Konzept- und frühen Entwurfsphase:

- Es wird erwartet, dass Studierende mit „frischer“, rein theoretisch vermittelter konstruktionsmethodischer Ausbildung innerhalb der gleichen Bearbeitungsdauer keine bessere Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzept- und frühen Entwurfsphase erzielen als vergleichbare Studierende ohne konstruktionsmethodische Ausbildung.
- Es wird erwartet, dass Studierende mit vertiefter, d.h. selbst praktisch angewandter, konstruktionsmethodischer Ausbildung eine höhere Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzept- und frühen Entwurfsphase erzielen als vergleichbare Studierende ohne konstruktionsmethodische Ausbildung.

3.4.5 Hypothesen zum Ausbildungseinfluss auf das tatsächlich zu beobachtende Vorgehen

Die gleichen Überlegungen wie in 3.4.4 lassen auch hier vermuten, dass je nach Grad der konstruktionsmethodischen Ausbildung das so erworbene Wissen unterschiedlich handlungswirksam wird. Die Forschungshypothesen in diesem Bereich lauten:

- Es wird erwartet, dass Studierende mit „frischer“ konstruktionsmethodischer Ausbildung konstruktionsmethodische Handlungsempfehlungen bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzept- und frühen Entwurfsphase im Vergleich zu vergleichbaren Studierenden ohne konstruktionsmethodische Ausbildung aufgrund mangelnder Internalisierung und Prozeduralisierung gar nicht oder eher in strikt hierarchischer Weise befolgen. Es wird erwartet, dass eine eher formale

Form des Methodeneinsatzes den Bearbeitungsaufwand steigert, ohne in jedem Falle zielführend zu sein.

- Es wird erwartet, dass Studierende mit vertiefter, d.h. selbst praktisch angewandter, konstruktionsmethodischer Ausbildung sich durch einen stärker internalisierten und prozeduralisierten und deshalb eher „flexibel-methodischen“ (FRICKE 1993) bzw. „flexibel-lösungsorientierten“ (RÜCKERT 1997) Methodeneinsatz von vergleichbaren Studierenden ohne konstruktionsmethodische Ausbildung unterscheiden, was im Ergebnis auch zu höherer Bearbeitungseffektivität führt.
- Es wird erwartet (vgl. Kapitel 3.4.3), dass ein *hierarchisch-prozessorientiertes*, strikt konstruktionsmethodischen Empfehlungen folgendes Vorgehen beobachtet werden kann sowie ein *hierarchisch-objektorientiertes* Vorgehen, bei dem der Konstruktionsauftrag entlang der zu bearbeitenden Teilsysteme zerlegt wird; außerdem drei andere, eher flexible bzw. „opportunistische“ Vorgehensstile: ein *opportunistisch-assoziatives* Vorgehen, das fallweise erinnerten Lösungen und spontanen Einfällen folgt, sowie ein überwiegend *rein probierendes* Vorgehen.

3.4.6 Hypothesen zum Einfluss des tatsächlich beobachteten Vorgehens auf die Lösungsgüte

Für die Konzeptphase kann erwartet werden, dass ein flexibel-methodisches bzw. flexibel-lösungsorientiertes Vorgehen Vorteile gegenüber einer strikten Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen bietet. Die Qualität der Beurteilung von Lösungsvarianten sollte sich bei Einhaltung der konstruktionsmethodischen Vorgehensempfehlungen verbessern, da es sich hier um einen stark diskursiv geprägten Arbeitsschritt handelt.

Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass in dieser Phase die in Kapitel 3.4.3 definierten hypothetischen Vorgehensstypen für die Vorentwurfsphase auch einen Einfluss auf die Lösungsgüte haben. Für diesen vermuteten Einfluss lassen sich jedoch keine auf gesicherten theoretischen Aussagen basierenden gerichteten Hypothesen formulieren. Es ist aufgrund früherer Befunde (vor allem FRICKE 1993, RÜCKERT 1997) allenfalls zu vermuten, dass ein strikt hierarchisch prozessorientiertes Vorgehen sich negativ auf die erzielbare Lösungsgüte auswirkt. Diese Überlegungen führen auf die folgenden Forschungshypothesen:

- Es wird erwartet, dass eine strikte und hierarchische Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzept- und der Vorentwurfsphase zu einer schlechteren Lösungsgüte führt, als eine „flexibel-methodische“ bzw. „flexibel-lösungsorientierte“ Befolgung dieser Handlungsempfehlungen.
- Es wird erwartet, dass die Qualität von Lösungsbeurteilungen und Auswahlentscheidungen in der Konzeptphase von der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen deutlich profitiert.

- Es wird erwartet, dass die vier hypothetischen Vorgehenstypen (vgl. Kapitel 3.4.3 und 3.4.5) einen signifikanten Einfluss auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der frühen Entwurfsphase haben, wobei ein hierarchisch-prozessorientiertes Vorgehen eher zu schlechteren Arbeitsergebnissen innerhalb der gleichen Bearbeitungsdauer führt.

4 Laborstudie: Ausbildung, Vorgehen, Konstruktionserfolg

Zur Beantwortung der in 1.1.2 formulierten Forschungsfragen und zur Überprüfung der in 3.4 formulierten Forschungshypothesen wurde eine ex post facto Laborstudie konzipiert, bei der der Einfluss der maßgeblichen Variable – die Form einer konstruktionsmethodischen Ausbildung – systematisch variiert wurde, um ihren Einfluss auf das Vorgehen und die Lösungsgüte in der Konzept- und frühen Entwurfsphase zu isolieren.

Es handelt sich dabei um eine Studie mit Studierenden aus den Studiengängen Maschinenbau und Verkehrswesen der TU Berlin, die zu verschiedenen Zeitpunkten ihres Studiums als Versuchspersonen zur Verfügung standen und in einer Laborumgebung standardisierte Testaufgaben bearbeiten sollten. Dabei wurden ihr Vorgehen und ihr individueller Konstruktionserfolg mit ebenfalls standardisierten Methoden und Werkzeugen gemessen. Die Wirksamkeit und Effektivität des individuellen Methodenerwerbs wurde dabei an qualitativen und quantitativen Ergebnisvariablen (Lösungsgüte) sowie an Prozessvariablen (Vorgehen) bestimmt.

Im Folgenden werden das Untersuchungsdesign und die eingesetzte Methodik für die Beobachtung, Datenerhebung und -auswertung genauer beschrieben.

4.1 Untersuchungsdesign

Das Ziel der Laborstudie war es, Ausbildungseinflüsse auf das Vorgehen und den Erfolg beim Konstruieren zu untersuchen. Obwohl es hier eine Vielzahl von Untersuchungen gibt (vgl. Kapitel 3), so haben doch nur wenige mit der notwendigen Validität gesicherte Erkenntnisse geliefert. Meist handelt es sich um Fallstudien oder qualitative und eher explorativ gerichtete Untersuchungen.¹⁶ Im vorliegenden Projekt war es jedoch das erklärte Ziel, mit einer großen Zahl von Versuchspersonen und unter Einsatz eines methodisch validen Instrumentariums auch statistisch gesicherte Aussagen zu erhalten. Hierzu mussten zunächst grundlegende Anforderungen an ein solches Untersuchungsdesign erfüllt werden.

4.1.1 Anforderungen an das Untersuchungsdesign

Empirische Forschung muss Mindestkriterien erfüllen, um valide Ergebnisse zu erzielen. Dieses ist in den sozialwissenschaftlichen Disziplinen eine allgemein anerkannte und auch in der Praxis in breitem Umfang eingesetzte Regel. In der ingenieurwissenschaftlichen Konstruktionsforschung werden diese Kriterien jedoch oft vernachlässigt. Grundlegende Gütekriterien für die empirische Forschung und Möglichkeiten ihrer Operationalisierung für die Konstruktionsforschung werden deshalb hier kurz diskutiert.

BORTZ & DÖRING 2002 (S. 56f. und S. 193ff.) sowie LIENERT & RAATZ 1998 (S. 29ff.) definieren Anforderungen standardisierter empirischer Verfahren (Abbildung 4-1).

¹⁶ In Summe haben sie allerdings weit überwiegend mindestens tendenziell übereinstimmende Aussagen, die wesentliches Fundament auch dieser Arbeit sind, erbracht, so dass ihre Bedeutung hier keinesfalls geschmälert werden soll.

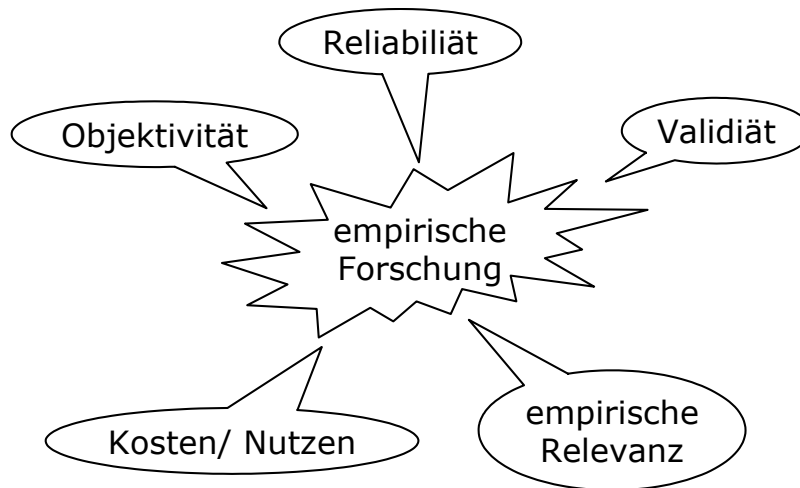


Abbildung 4-1: Gütekriterien für empirische Forschung

Die Einhaltung dieser Gütekriterien wirft in der Konstruktionsforschung besondere Probleme auf und erfordert deshalb z.T. spezifische Anpassungen an den besonderen Untersuchungsgegenstand:

- Objektivität, d.h. die intersubjektive Übereinstimmung in Durchführung, Auswertung und Interpretation einer Untersuchung

Die Objektivität einer Untersuchung gibt an, in welchem Maße die Untersuchungsergebnisse vom Durchführenden der Untersuchung unabhängig sind. Für die Durchführung einer Untersuchung bedeutet dies, dass z.B. eine zu bearbeitende Testaufgabe unabhängig davon, wer die Aufgabe stellt, von allen Versuchsteilnehmern gleich verstanden werden muss. Bei der Auswertung sollten alle Auswerter zu identischen Beurteilungen kommen und auch bei der Interpretation von Untersuchungsergebnissen dürfen individuelle Deutungen nicht einfließen. Diese Anforderungen sind in der Konstruktionsforschung kaum vollständig einzuhalten. So ist z.B. die Normierung der Ergebnisse von Konstruktionsprozessen unmöglich, eine ideale Referenzlösung gibt es in der Regel nicht. Gleichwohl kann durch geeignete Verfahren eine möglichst hohe Objektivität angestrebt werden. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Auswertungsobjektivität ist z.B. die Bildung von Auswertegruppen.

- Reliabilität, d.h. die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, mit der ein Merkmal gemessen werden kann

Reliabilität beschreibt die Zuverlässigkeit der verwendeten Verfahren und Methoden. Im Idealfall einer vollständigen Reliabilität einer Untersuchungsmethode liefert diese den „wahren“ Wert eines Merkmals ohne jeden Fehler. Aus dem Reliabilitätskriterium ergeben sich für die Gestaltung einer Untersuchungsmethode zwei Ziele. Die *Retestreliabilität* strebt an, dass Auswerter zu einem späteren Zeitpunkt mit der gleichen Untersuchungsmethode wieder zum gleichen Auswertungsergebnis gelangen. *Paralleltestreliabilität* bedeutet, dass eine andere Operationalisierung der gleichen Untersuchungsmethode – d.h. z.B. eine ähnliche Version einer Testaufgabe – zum gleichen Ergebnis führt. Dieses Kriterium stellt besonders hohe Anforderungen an Testaufgaben in der

Konstruktionsforschung, da es besonders schwierig ist, verschiedene Operationalisierungen der gleichen Konstruktionsaufgabe zu formulieren (vgl. Kapitel 4.1.4). In der vorliegenden Studie, bei der eine Vielzahl von Auswertungen auf qualitativen Schätzurteilen beruht, wurde die Reliabilität der Analyse und Interpretation erhobener Daten durch die kooperative Herstellung der Beurteilerübereinstimmung in eine Beurteilergruppe – bestehend aus jeweils mindestens zwei Konstruktionsexperten – sichergestellt.

- Validität oder Gültigkeit, d.h. die Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse

Validität bezeichnet die Güte, mit der eine Untersuchungsmethode diejenigen Merkmale misst, die sie zu messen vorgibt. Das bedeutet insbesondere, dass ein Untersuchungsergebnis auch tatsächlich auf den Einfluss einer unabhängigen Variablen zurückzuführen ist, d.h. dass es neben der Untersuchungshypothese keine vernünftige Alternativerklärung gibt. Dieses lässt sich z.B. dadurch sicherstellen, dass zur Überprüfung der gleichen Hypothese verschiedene Untersuchungsmethoden eingesetzt werden.

- empirische Relevanz, d.h. die Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen aus einer experimentellen Situation in die Realität

Dieses auch als „externe Validität“ bezeichnete Kriterium ist für die experimentelle Forschung im Labor besonders wichtig. In einem Experiment soll eine künstliche Situation geschaffen werden, in der sich Variablen besonders gut beobachten und vor allem isolieren lassen, um die anderen Gütekriterien – vor allem Objektivität und Reliabilität – besser als z.B. in einer Feldstudie erfüllen zu können. Die künstliche Laborsituation muss aber gleichwohl die reale Situation, über die sie Aussagen ermöglichen soll, so abbilden, dass die Aussagen tatsächlich generalisierbar und auf die Realität übertragbar sind. Hierfür muss sie so viele Merkmale der realen Situation aufweisen wie möglich.

- Kosten/ Nutzen, d.h. die Effizienz der eingesetzten Verfahren und Methoden

Dieses Kriterium beschreibt vor allem die ausgeglichene Balance zwischen dem Aufwand zur Erhebung und Auswertung von Daten und dem daraus gewonnenen tatsächlichen Nutzen, der sich vor allem in der Aussagekraft der Ergebnisse bemisst. Insbesondere bei Studien, die Beobachtung, Analyse und Interpretation komplexer menschlicher Denk- und Handlungsprozesse zum Gegenstand haben, erreicht die Menge zu erhebender Daten schnell Dimensionen, die nicht mehr handhabbar sind (z.B. bei der Videobeobachtung vieler Versuchspersonen über lange Zeiträume). Die weitere Analyse einer solchen Datenmenge sprengt dann schnell jeden vernünftigen Rahmen. Es ist deshalb von besonderer Bedeutung, vorab zu definieren, welche Daten mit welchen Methoden und in welchem Umfang erhoben und auf welche Weise diese dann weiter verarbeitet werden sollen. Auch der Aufwand potenzieller Versuchspersonen, die ihre Zeit und personenbezogene Daten zur Verfügung stellen sollen und sich in eine ggf. körperlich und psychisch belastende Untersuchungssituation begeben, muss dabei unbedingt berücksichtigt werden.

Um diese vier Gütekriterien auch in der Konstruktionsforschung zu erfüllen, muss ein Forschungsdesign für eine empirische Laborstudie einem systematischen Ansatz folgen, der die folgenden Arbeitsschritte umfasst (vgl. auch BENDER ET AL. 2001A):

- Untersuchungsplanung und Pretest,
- Untersuchungsdurchführung und Datenerhebung,
- Dokumentation der erhobenen Daten,
- Analyse der erhobenen Daten,
- Interpretation der Ergebnisse der Datenanalyse

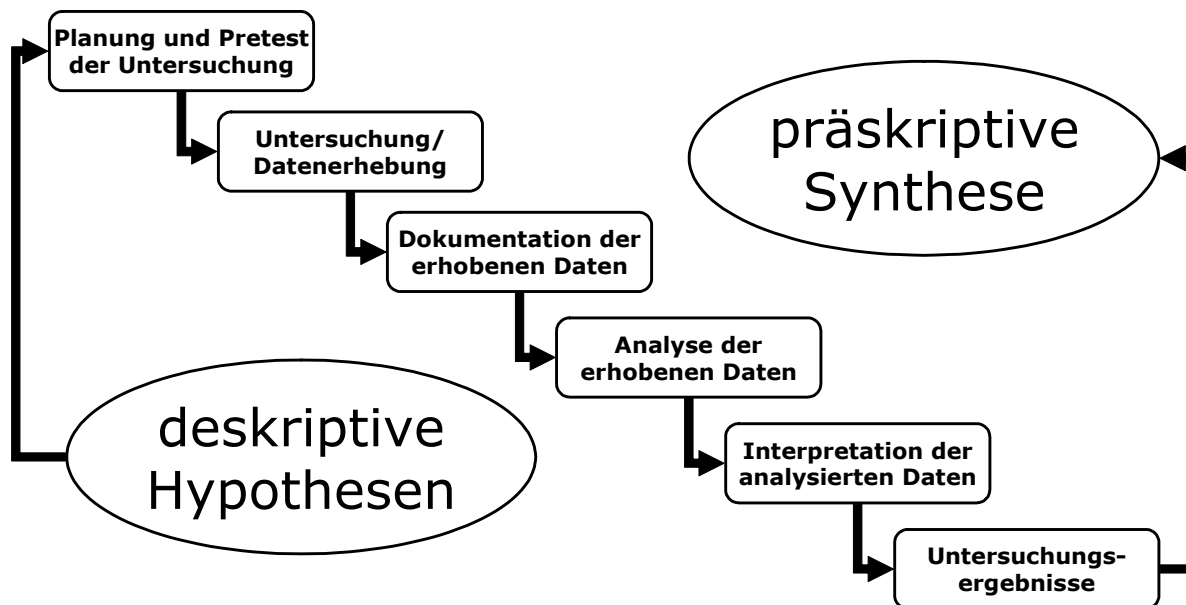


Abbildung 4-2: Systematisches Vorgehen in empirischen Laborstudien

Dieser Ansatz wurde bei der hier beschriebenen Laborstudie konsequent umgesetzt. Auf der Basis der Forschungshypothesen (vgl. Kapitel 3.4) wurde eine ex post facto Untersuchung systematisch geplant und in allen wesentlichen Elementen vorab getestet. Dabei wurden unter anderem Kriterien für die Auswahl von Versuchspersonen, Testaufgaben zur Bearbeitung durch die Versuchspersonen, unabhängige und abhängige Variablen der Beobachtung sowie räumliche und zeitliche Randbedingungen der Laborversuche definiert.

Für die Datenerhebung wurde auf erprobte Methoden der komplexen Handlungsanalyse zurückgegriffen:

- die Beobachtung handelnder Personen während ihrer Handlungen,
- die Analyse der Produkte und Ergebnisse (z.B. Dokumente) der Handlungen,
- die retrospektive Befragung handelnder Personen über ihr Handeln.

Zur Vorgehensbeobachtung wurde eine diskontinuierliche, nicht teilnehmende, offene Fremdbeobachtung der Versuchspersonen durch die Versuchsleiter unter Einsatz technischer Hilfsmittel gewählt (ausführlich vgl. Kapitel 4.2).

Für die Analyse der so erhobenen Daten wurde ein Instrumentarium eingesetzt, das es erlaubt, die Beobachtungen so aufzubereiten, dass diese systematisch dokumentiert und klassifiziert werden konnten. Es handelte sich dabei in großem Maße um interpretationsbedürftige eher qualitative Beobachtungen, die über standardisierte Kodierungsschemata einer quantitativen Analyse zugänglich gemacht wurden. Die Interpretation der so analysierten Daten erfolgte auf der Basis der in den Kapiteln 2.1 und 3.1 dargelegten präskriptiven und deskriptiven theoretischen Grundüberlegungen aus der Konstruktionsforschung sowie der in 2.3 umrissenen Erkenntnisse der kognitionspsychologischen Forschung zum komplexen Problemlösen und zielgerichteten Handeln (ausführlich vgl. Kapitel 4.3).

4.1.2 Aufbau und Ablauf der Untersuchung

Da Ausbildungseinflüsse auf das individuelle Konstruktionshandeln im Mittelpunkt der Studie standen, wurden die Versuchspersonen aus der Grundgesamtheit der Studierenden der Studiengänge Maschinenbau und Verkehrswesen der TU Berlin zu definierten Zeitpunkten ihrer Konstruktionsausbildung ausgewählt. Diese wurden in Anlehnung an ein Längsschnittdesign¹⁷ in am Studienverlauf orientierte Versuchsgruppen eingeteilt. Zusätzlich wurden Kontrollgruppen, d.h. Gruppen, die dem vermuteten Einfluss der unabhängigen Variable nicht ausgesetzt wurden, gebildet. Da die Einteilung der Versuchs- und Kontrollgruppen nicht durch zufällige Wahl durch die Versuchsleiter erfolgte, sondern Folge einer individuellen Studienrichtungsentscheidung der Versuchspersonen war, handelt es sich um ein ex post facto Design¹⁸, das besondere Sorgfalt bei der Auswertung der erhobenen Daten erfordert, um systematische Störeinflüsse, die nicht auf die untersuchten unabhängigen Variablen zurückzuführen sind, auszuschließen. Insgesamt nahmen an der Studie 71 Studierende teil, was – durch Mehrfachteilnahmen aufgrund des verlaufsorientierten Gruppendesigns – 107 auswertbare Fälle ergab, von denen schließlich 83 Fälle tatsächlich ausgewertet werden konnten (zu Details der Auswahl der Versuchspersonen und der auswertbaren Fälle siehe Kapitel 4.1.3).

Untersucht wurden die Vorgehensweisen beim Konstruieren auf den drei Ausbildungsniveaus (Abbildung 4-3)

- A1 ohne konstruktionsmethodische Ausbildung nach Abschluss des Prüfungsfaches „Konstruktionslehre“ am Ende des Grundstudiums;
- A2 mit „frischer“ und nur theoretischer konstruktionsmethodischer Ausbildung nach dem Besuch der Vorlesung im Fach „Methodisches Konstruieren“;

¹⁷ Ein Längsschnittdesign in streng methodischem Sinne konnte nicht realisiert werden, da für über alle Ausbildungsniveaus hinweg homogene Versuchs- und Kontrollgruppen nicht genügend Versuchspersonen zur Verfügung standen.

¹⁸ Eine derartige Situation tritt z.B. in der medizinischen Forschung häufig auf, wenn Daten einer Patientengruppe mit denen einer Kontrollgruppe gesunder Personen verglichen werden. Auch hier erfolgt die Zuordnung zu den Gruppen nicht durch Zufall, so dass systematische Störeinflüsse nicht ausgeschlossen werden können.

A3 mit vertiefter konstruktionsmethodischer Ausbildung nach der Teilnahme an einer sechsmonatigen Projektarbeit zum Fach „Methodisches Konstruieren“

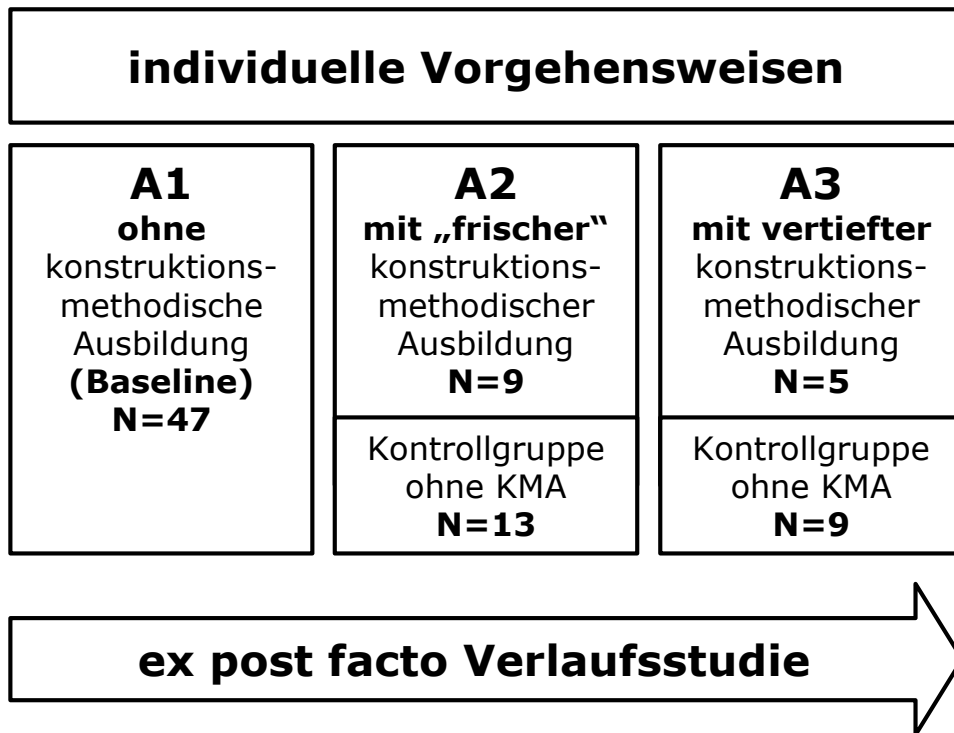


Abbildung 4-3: Übersicht über das verlaufsorientierte Gruppendesign der Laborstudie

In einer standardisierten Laborumgebung wurden die Versuchspersonen auf jedem der Ausbildungsniveaus A1 – A3 jeweils mit einer Konstruktionsaufgabe aus der Konzeptphase und einer aus der frühen Entwurfsphase konfrontiert (vgl. Kapitel 4.1.4). Das erste Ausbildungsniveau (A1) galt dabei der Erhebung der Ausgangswerte der Stichprobe vor Einsatz der intervenierenden Variablen „konstruktionsmethodische Ausbildung“ im Sinne einer Baseline.

In den hier zur Abgrenzung von den Versuchgruppen negativ definierten „nicht konstruktionsmethodisch ausgebildeten“ Kontrollgruppen handelt es sich dabei keineswegs um Gruppen ohne jeden Ausbildungsfortschritt, da auch die Studierenden in diesen Gruppen in ihrem ingenieurwissenschaftlichen Studium fortschreiten. Diese Studie liefert deshalb Ergebnisse über Unterschiede zwischen zwei Ausbildungskohorten, die zum einen *auch* konstruktionsmethodisch ausgebildet wurden und sich zum anderen ganz allgemein in ihrer Ausbildung vom Anfängerniveau entfernen. So können auch Aussagen über den Einfluss der allgemeinen ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung auf den Kompetenzerwerb beim Lösen von Konstruktionsproblemen gemacht werden.

Die Versuche wurden jeweils parallel in Gruppen mit bis zu 60 Versuchspersonen und einer Gesamtdauer von ca. sechs Stunden durchgeführt. Die Versuche folgten dabei einem genau überwachten Ablauf, der in Abbildung 4-4 dargestellt ist.

Mit Hilfe von Fotodokumentation, Selbstprotokollierung und der Nutzung unterschiedlicher Stifffarben in unterschiedlichen Zeitabschnitten des Versuches wurden verschie-

dene Vorgehensvariablen erhoben. Zur Untersuchung kognitiver Repräsentationen¹⁹ des individuellen Vorgehens wurden die Versuchspersonen zudem aufgefordert, vorab nach Kenntnis der Aufgabenstellung ihr geplantes und nach Abschluss der Bearbeitung ihr retrospektiv wahrgenommenes Vorgehen zu dokumentieren. Hierfür wurden die Methode der *Strukturlegetechnik*, bei der die Versuchspersonen ihr Vorgehen durch Angabe einzelner Tätigkeiten auf Kärtchen und anschließendes Sortieren dieser Kärtchen in einer dem Arbeitsfortschritt entsprechenden Reihenfolge dokumentieren, sowie ein Nachbefragungsbogen eingesetzt. Zudem wurden berufs- und bildungsbiographische Grundmerkmale sowie die heuristische Kompetenz der Versuchspersonen in weiteren Fragebogen erhoben.

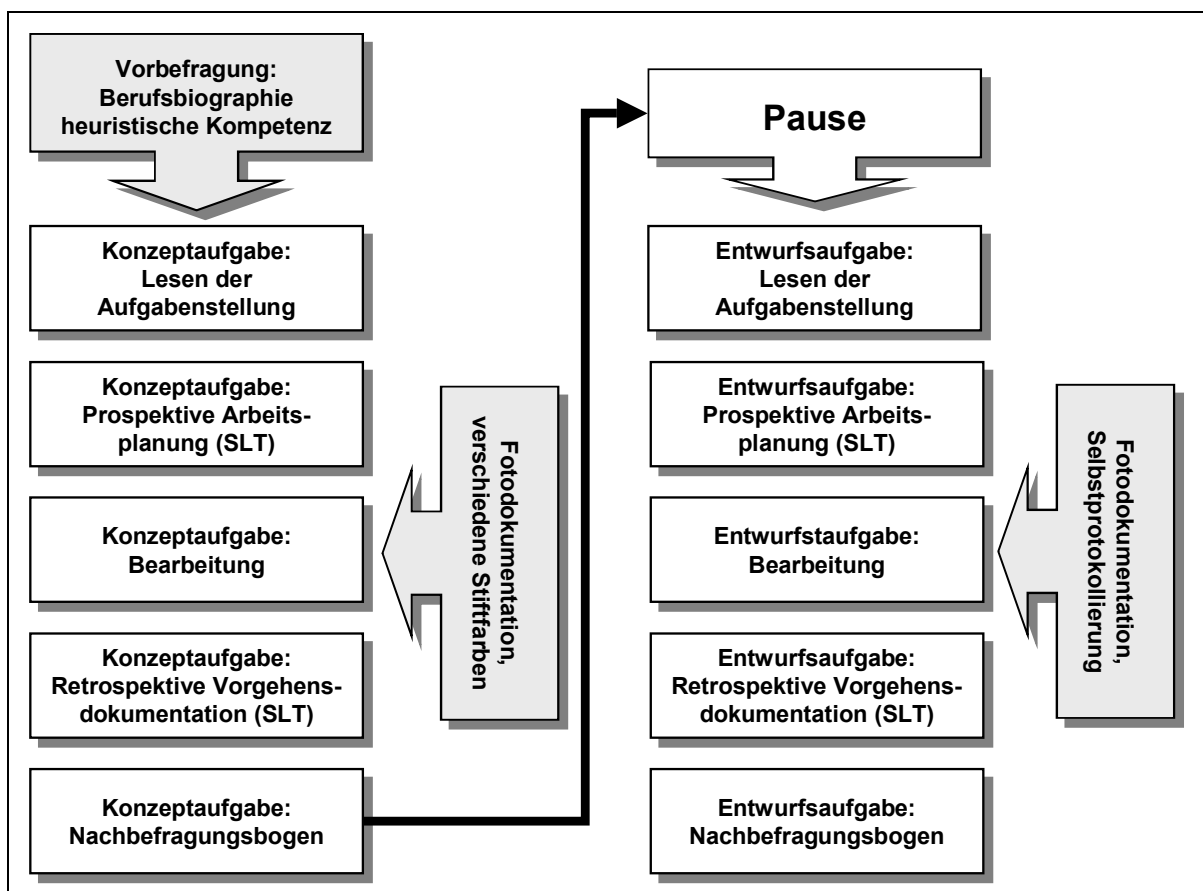


Abbildung 4-4: Versuchsablauf (Abk. SLT = Strukturlegetechnik)

Der Versuchsablauf und die eingesetzten Konstruktionsaufgaben wurden im Rahmen eines ausführlichen Pretests geprüft. Die Versuche fanden in geeigneten Räumlichkeiten der TU Berlin statt und den Versuchspersonen standen Zeichenbretter, Schreib- und Zeichenhilfsmittel sowie benötigte Fachliteratur in Form von Handbüchern, Normensammlungen und Maschinenelementekatalogen zur Verfügung. Den Versuchslei-

¹⁹ Diese sind vor allem Gegenstand des kognitionspsychologischen Forschungsinteresses im Rahmen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojekts und werden im Rahmen eines weiteren Dissertationsvorhabens an der TU Dresden untersucht (PIETZCKER 2004).

tern wurden standardisierte Instruktionen zur Verfügung gestellt, die diese zu Beginn der jeweiligen Versuchsabschnitte verlasen.



Abbildung 4-5: Versuchsdurchführung

In allen auf diese Weise durchgeführten Versuchen war die Motivation und Disziplin der Versuchspersonen außerordentlich hoch, die Versuchsaufgaben wurden durchweg konzentriert und engagiert bearbeitet.

Dieses Untersuchungsdesign ermöglichte eine effiziente Durchführung von komplexen Handlungsanalysen als Gruppenversuch mit großen Teilnehmerzahlen. Solche Analysen waren bisher nur in aufwendigen Einzelversuchen und mit erheblich aufwändigeren Methoden – wie Videoprotokollierung oder protokolliertes lautes Denken – möglich. Die Versuchspersonen empfanden die Laborsituation nach übereinstimmender Auskunft als kaum beeinträchtigend für ihre Arbeit.

4.1.3 Auswahl der Versuchspersonen

Für die vorliegende Studie konnten aus der Gesamtheit aller Studierenden der Studiengänge Maschinenbau und Verkehrswesen der TU Berlin 71 Studierende für die freiwillige Teilnahme an der Untersuchung gewonnen werden. Allen diesen Studierenden ist gemeinsam, dass sie als Pflichtfach im Grundstudium das Fach „Konstruktionslehre“ über einen Zeitraum von vier Semestern und mit einem Gesamtumfang von 18 Semesterwochenstunden (SWS) belegen müssen (vgl. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Curriculum des Prüfungsfaches „Konstruktionslehre“ im Grundstudium der Studiengänge Maschinenbau und Verkehrswesen an der TU Berlin

Gruppe	Sem.	Bezeichnung	Umfang	Inhalt
A1 (Baseline)	1	Konstruktionslehre I	1 SWS Vorlesung 3 SWS Übung	Technische Zeichnungen, Darstellung und Bemaßung von Bauteilen, Einführung in die DIN-Normen. Toleranzen und Passungen. Einführung in die CAD-Zeichentechnik.
	2	Konstruktionslehre II	2 SWS Vorlesung 2 SWS Übung	Grundlagen der funktions-, beanspruchungs- und fertigungsorientierten Gestaltung und Dimensionierung von Bauteilen, Gestaltung und Berechnung einfacher Konstruktionen.
	3	Konstruktionslehre III	4 SWS Vorlesung 2 SWS Übung	Grundlagen der Gestaltung und Dimensionierung komplexer Baugruppen wie Welle-Nabe-Verbindungen, Wälz- und Gleitlagerungen; Kupplungen; Getriebe; Gestaltung und Berechnung komplexer Baugruppen und Maschinen.
	4	Konstruktionslehre IV	4 SWS Projektübung	Bearbeitung einer komplexen Entwurfsaufgabe in einer Gruppe aus 6 Studierenden; Entwurf, Gestaltung, Dimensionierung; Arbeitsplanung und Projektdokumentation.

Es wurden Studierende am Ende des vierten Fachsemesters rekrutiert, nach Abschluss der Projektübung, jedoch vor Ablegen der Abschlussprüfung im Fach Konstruktionslehre. Auf diese Weise konnte eine hinsichtlich des Ausbildungsstandes in Bezug auf das Entwickeln und Konstruieren homogene Stichprobe gewonnen werden. Um die Homogenität in dieser Hinsicht weiter abzusichern, wurden von allen Teilnehmern berufsbiographische Daten erhoben, die es ermöglichten, sicherzustellen, dass keine Teilnehmer mit erweiterten Erfahrungen oder weiteren Ausbildungen auf diesem Gebiet in der Studie verblieben.

Im weiteren Studienverlauf bleibt es den Studierenden selbst überlassen, ob und in welcher Form sie eine weitere Konstruktionsausbildung erhalten. Im Studiengang Maschinenbau gibt es die Möglichkeit, die Studienrichtung „Konstruktionstechnik“ einzuschlagen, die das Prüfungsfach „Methodisches Konstruieren“ und bei entsprechender Studienfachwahl auch eine Projektübung zu diesem Fach (vgl. Tabelle 4-2) enthält.

Tabelle 4-2: Curriculum des Faches „Methodisches Konstruieren“ im Hauptstudium des Studienganges Maschinenbau an der TU Berlin

Gruppe	Sem.	Bezeichnung	Umfang	Inhalt
A2	6	Methodisches Konstruieren I	2 SWS Vorlesung	Aufbau, Struktur und Lebensphasen technischer Produkte. Prozess des Planens, Entwickelns und Konstruierens. Methoden der Produktplanung und Aufgabenklärung. Methoden zum Konzipieren und Projektieren.
	7	Methodisches Konstruieren II	2 SWS Vorlesung	Entwurfsmethodik: Arbeitsschritte, Zielsetzungen, Grundregeln, Prinzipien und Richtlinien zur Gestaltung; Rationalisierungsmöglichkeiten: Baureihen, Baukastensysteme, Wertanalyse; Fehler- und Störgrößenanalyse; Kostenerkennung; Formgebung.
A3	7	Projektarbeit zum Fach Methodisches Konstruieren	500 h Projektarbeit	Bearbeitung eines komplexen Konstruktionsauftrags in einer Gruppe aus 6 Studierenden; Anforderungsanalyse, Funktionsanalyse, Konzeptentwicklung; Entwurf, Gestaltung, Dimensionierung; Projektmanagement, Arbeitsplanung und Projektdokumentation.

Aus den Teilnehmern dieses Prüfungsfaches wurde die Versuchsgruppe auf dem Ausbildungsniveau A2 („frische“ konstruktionsmethodische Ausbildung) gewonnen, und zwar nach Teilnahme an der Vorlesung „Methodisches Konstruieren I“. Die Versuchsgruppe auf dem Ausbildungsniveau A3 (vertiefte konstruktionsmethodische Ausbildung) wurde aus der Gesamtheit der Teilnehmer nach Beendigung der Projektarbeit gewonnen. Die parallelen Kontrollgruppen wurden aus Studierenden der entsprechenden Fachsemester rekrutiert, die dieses Prüfungsfach nicht gewählt und auch keine andere Form konstruktionsmethodischer Ausbildung erhalten hatten.

Auf beiden Ausbildungsniveaus nahmen auch Teilnehmer aus anderen Semesterkohorten als derjenigen, aus der die Stichprobe zu A1 gewonnen wurde, an der Untersuchung teil. Dieses war notwendig, um die notwendige Zahl freiwilliger Versuchspersonen gewinnen zu können. Um mögliche systematische Störeinflüsse auszuschließen, mussten deshalb weitere Maßnahmen zur Homogenisierung der jeweiligen Gruppen vorgenommen werden. Diese Homogenisierung geschah über das Kriterium einer *Mindestfachkompetenz* in Bezug auf das Entwickeln und Konstruieren, die für einen Verbleib von Versuchspersonen in der Studie gefordert wurde. Da die Stichprobe zu A1 vor dem Ablegen der Prüfung im Fach Konstruktionslehre gewonnen wurde, konnte nicht davon ausgegangen werden, dass alle Teilnehmer an der Studie die notwendigen fachlichen Voraussetzungen für die Studie mitbrachten. Um die Einflüsse der zu untersuchenden Variablen sicher zu isolieren, musste jedoch sichergestellt sein, dass nicht andere Einflüsse die zu untersuchenden Effekte überlagerten. Das Fehlen elementarer Grundkenntnisse des Entwerfens und Konstruierens wäre so ein störender externer Einfluss gewesen²⁰. Um ein Mindestniveau an fachlicher Entwurfskompetenz aller Ver-

²⁰ Ein vergleichbares Beispiel wäre eine Untersuchung von Einflüssen auf die Behaltensquote von Texten nach einmaligem Lesen. In diesem Fall müsste man sicherstellen, dass nur Versuchspersonen in der Studie verbleiben, die

suchspersonen sicherzustellen, wurden alle Versuchspersonen, die bei der Bearbeitung der Vorentwurfsaufgabe nicht mindestens 40% (d.h. 24 von 60 Lösungsgütepunkten²¹) der maximal erzielbaren Lösungsgüte erreichten, in der weiteren Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Das gleiche Kriterium wurde auch auf den beiden späteren Ausbildungsniveaus auf die Versuchs- und Kontrollgruppen zur Homogenisierung angewandt. Von den mit den 71 Versuchspersonen über den gesamten Verlauf der Studie gewonnenen 107 verwertbaren Fällen wurden deshalb 24 Fälle ausgesondert, so dass am Ende eine Fallzahl von 83 Fällen verwertet werden konnte. Dieses ex post facto Kriterium wurde mittels einer Sensitivitätsanalyse, bei der das Maß der geforderten Minimallösungsgüte beim Lösen der Entwurfsaufgabe um die 40%-Grenze variiert wurde, validiert.

Die Versuchspersonen wurden entsprechend den Regeln und Grundsätzen guter wissenschaftlicher Praxis umfassend mündlich und schriftlich über die Untersuchung aufgeklärt. Alle Versuchspersonen erklärten schriftlich ihre Zustimmung zur freiwilligen Teilnahme an der Studie und zur Verarbeitung der im Rahmen der Studie erhobenen Daten. Die Teilnahme auf dem Ausbildungsniveau A1 wurde für die Versuchspersonen dadurch honoriert, dass diese eine kurzfristige und detaillierte Rückmeldung über ihren Konstruktionserfolg erhielten, was diese für die Vorbereitung auf ihre Abschlussprüfung nutzen konnten („Probeklausur“). Die Teilnahme auf dem Ausbildungsniveau A2 wurde mit einer Sachprämie (Fachbuch), die Teilnahme auf dem Ausbildungsniveau A3 durch die Möglichkeit zur Teilnahme an einer kostenlosen CAD-Schulung honoriert.

Bei der Verarbeitung der personenbezogenen Daten wurden einschlägige Vorschriften des Datenschutzes berücksichtigt.

4.1.4 Auswahl und Standardisierung der Versuchsaufgaben

Obwohl in Studien der empirischen Konstruktionsforschung, in denen Versuchspersonen Konstruktionsaufgaben unter Beobachtung bearbeiten sollen, im Regelfall nicht individuelle Konstruktionsfähigkeiten getestet, sondern Vorgehensweisen analysiert und deskriptive Vorgehensmodelle abgeleitet werden sollen, weist die Untersuchungssituation doch alle Merkmale eines Tests kognitiver Leistungsfähigkeit auf. Deshalb ist es nahe liegend, allgemein anerkannte Anforderungen an solche Tests auf die Formulierung von Konstruktionsaufgaben für empirische Laborstudien in der Konstruktionsforschung zu übertragen. Eine fundamentale Grundaussage der Testtheorie besteht darin (vgl. die umfangreiche Diskussion über Geschwindigkeits- vs. Leistungstests, z.B. in LIENERT & RAATZ 1998, S. 34ff.) dass die Lösungsgüte, die Bearbeitungszeit und der Umfang der Testbearbeitung abhängige Variablen sind, die nicht gleichzeitig in einem Test valide gemessen werden können. Mindestens eine davon muss den Testteilnehmern vorgegeben werden. Da das Testergebnis in jedem Falle die zentrale zu mes-

überhaupt lesen können bzw. die Sprache, in der die zu lesenden Texte verfasst sind, in ausreichender Weise beherrschen.

²¹ zur Beurteilung der Lösungsgüte vgl. Kapitel 4.4

sende Variable ist, muss eine der beiden anderen vorab definiert werden. Das führt auf zwei grundsätzlich unterschiedliche Testtypen, nämlich

- Geschwindigkeitstests, bei denen die Testteilnehmer ein im Umfang vorgegebenes Testergebnis erreichen müssen und die zur Bearbeitung zur Verfügung stehende Zeit als abhängige Variable gemessen wird;
- Leistungstests, bei denen die zur Bearbeitung einer oder mehrerer Testaufgaben zur Verfügung stehende Zeit vorgegeben wird und der innerhalb dieser Zeit erreichte Bearbeitungsumfang als abhängige Variable gemessen wird.

Die unter 4.1.1 genannten Gütekriterien für empirische Forschung gelten auch für die Formulierung von Testaufgaben. Neben Objektivität, Reliabilität, Validität, empirischer Relevanz und einem angemessenen Verhältnis von Kosten und Nutzen ist bei der Formulierung von Testaufgaben ein weiteres Gütekriterium, der angemessene Schwierigkeitsgrad, von besonderer Bedeutung. Dieses Kriterium ist z.B. für Prüfungssituationen in Schule, Studium und Ausbildung unmittelbar einsichtig, es gilt aber auch für Konstruktionsaufgaben in der empirischen Konstruktionsforschung.²²

Ein angemessener Schwierigkeitsgrad bedeutet, dass eine Konstruktionsaufgabe an die tatsächlichen Möglichkeiten der Versuchspersonen angepasst sein sollte, um diese weder zu über- noch zu unterfordern. Im Falle einer in der Aufgabenformulierung begründeten Überforderung der Versuchspersonen besteht die Gefahr, dass diese ein unbefriedigendes Versuchsergebnis als persönliches Scheitern und über die Versuchssituation hinaus gültiges Urteil über mangelnde persönliche Fähigkeiten interpretieren, obwohl ihnen eine erfolgreiche Bearbeitung objektiv gar nicht möglich war. Dieses ist insbesondere bei studentischen Versuchspersonen ethisch fragwürdig und nicht mit den Grundsätzen guter wissenschaftlicher Praxis vereinbar. Im Falle der Unterforderung durch eine Versuchsaufgabe sind solche negativen Auswirkungen nicht zu befürchten, jedoch hat auch dieses negative Auswirkungen auf die Motivation und Konzentration der Versuchspersonen. In beiden Fällen leidet die Akzeptanz des gesamten Untersuchungsdesigns erheblich.

Konstruktionsaufgaben für die empirische Forschung müssen deshalb so formuliert werden, dass die Versuchspersonen die Aufgabe

- in der vorgesehenen Zeit,
- auf Grundlage des individuellen Wissens, der individuellen Fähigkeiten und Fertigkeiten,
- mit den zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln

²² Diese Erkenntnisse sind ganz offensichtlich auch auf Prüfungssituationen in der universitären Konstruktionsausbildung zu übertragen. Nach Erfahrungen des Autors werden diese jedoch nur selten in der Praxis auch berücksichtigt.

bearbeiten können. Der Überprüfung der angemessenen Schwierigkeit einer Konstruktionsaufgabe muss deshalb in einem Pretest besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

In der vorliegenden Studie wurden zwei Typen von Konstruktionsaufgaben aus dem Bereich der mechanischen Konstruktion verwendet:

- Konzeptaufgaben, bei denen die Versuchspersonen auf Basis einer rein verbalen Aufgabenbeschreibung Lösungskonzepte erarbeiten sollten;
- Entwurfsaufgaben, bei denen die Versuchspersonen auf der Basis eines vorgegebenen Lösungsprinzips und einiger zentralen Anforderungen einen Vorentwurf erarbeiten sollten.

Aufgrund des verlaufsorientierten Gruppendesigns, das Mehrfachteilnahmen einzelner Versuchspersonen zur Folge hatte, wurden für beide Aufgabentypen je drei verschiedene Konstruktionsaufträge mit gleichen Anforderungen an kognitive Heuristiken formuliert, um Trainingseffekte zu vermeiden. In allen Konstruktionsaufträgen musste ein mechanischer Trennvorgang eines Stoffes realisiert, eine gegebene rotatorische Antriebsenergie in eine definierte Wirkbewegung umgewandelt werden. Es handelte sich im Einzelnen um Konstruktionsaufträge zur Konzipierung bzw. zum Vorentwurf

- eines Gartenhäckslers,
- einer Glasmühle,
- eines Papier-Cutters.

Dabei erhielten die Versuchspersonen innerhalb eines Versuchsdurchlaufs für die Konzept- und die Vorentwurfsphase jeweils Konstruktionsaufträge, die das gleiche Produkt zum Inhalt hatten.

Die empirische Relevanz bzw. externe Validität der eingesetzten Konstruktionsaufträge wurde zum einen dadurch gesichert, dass es sich inhaltlich ganz offensichtlich um gewöhnliche Aufträge aus der normalen Entwicklungspraxis in der mechanischen Konstruktion handelte (Augenscheinvalidität).

Ein weiteres wichtiges Kriterium in diesem Bereich war, auch prozedural in der Formulierung der Konstruktionsaufträge möglichst viele Merkmale der frühen Phasen der Produktentwicklung abzubilden. Aufgaben und Probleme, denen sich Entwickler und Konstrukteure in diesen Phasen gegenübersehen sind z.B. in der Regel nur ungenau definiert („ill-defined“) und enthalten deutlich weniger Einschränkungen als Aufgaben und Probleme in späteren Phasen wie z.B. der Detailentwurfsphase. Laboraufgaben für Studien, die mit möglichst hoher empirischer Relevanz Aussagen über den Umgang mit solchen Aufgaben und Problemen liefern sollen, müssen versuchen, diese spezifischen Anforderungen möglichst gut nachzubilden.

4.1.4.1 Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase

In der Konstruktionsmethodik ist der Übergang von der Produktplanung und Aufgabeklä rung zur Konzeptphase durch die Formulierung einer vorläufigen *Produktdefinition* – bestehend vor allem aus einer Funktionsbeschreibung und einer vorläufigen, lösungsneutralen Anforderungsformulierung – definiert (PAHL & BEITZ 1997, S. 164). Diese sind somit Ausgangsbedingungen für die Konzeptphase, in der konkrete Lösungsvarianten generiert werden sollen. Beide müssen entsprechend Bestandteil eines Konstruktionsauftrages für die Konzeptphase unter Laborbedingungen sein. Einfache verbale Beschreibungen können hierfür genügen, es können jedoch auch detaillierte Vorgaben – z.B. umfangreiche Anforderungslisten – enthalten sein. In der vorliegenden Studie wurde für die Konzeptaufträge eine rein verbale Beschreibung des Auftrags gewählt (Abbildung 4-6).

Technische Universität Berlin Institut für Maschinenkonstruktion - Konstruktionstechnik - DFG 479/68-1, O1	Vpn-Nummer:
<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 10px auto; width: 80%;"> Konzeptaufgabe O1 </div>	
<p><u>Aufgabenstellung:</u></p> <p style="text-align: center;"><i>Lösungssuche -variation und -bewertung für einen Gartenhäcksler</i></p> <p>Die Zahl der Gartenbesitzer wird immer größer. Im Verlaufe eines Gartenjahres fallen je nach Grundstücksgröße mehr oder weniger große Mengen von Grünabfällen, Ästen und Reisig an. Hierdurch entsteht das Problem, wohin mit dem Bio-Müll? Ein leistungsstarker Gartenhäcksler bietet die optimale Lösung. Das anfallende Abfallvolumen wird reduziert und das gewonnene Häckselgut eignet sich hervorragend für die Kompostierung oder zum Mulchen. Das Holz wird per Hand zugeführt, durch einen entsprechenden Mechanismus zerkleinert und definiert ausgeworfen.</p> <p><u>Aufgabenstellung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Es sind mindestens drei unterschiedliche Konzeptvarianten für die Zerkleinerung von Holz zu erarbeiten. - Die Lösungskonzepte sind in Skizzenform so zu visualisieren, daß das Wirkprinzip und die geometrische Anordnung der maßgeblichen Komponenten erkennbar ist. - Alle Konzeptvarianten sind zusätzlich kurz zu beschreiben und zu beurteilen (Funktion, wesentliche Merkmale, Vor- und Nachteile). 	

Abbildung 4-6: Beispiel für einen Konstruktionsauftrag für die Konzeptphase²³

²³ Sämtliche Konzeptaufträge sind im Anhang (8.1.1) dokumentiert.

Merkmale des situativen Kontextes der Konzeptphase lassen sich im Labor durch die Bereitstellung typischer Hilfsmittel nachbilden. Diese sind insbesondere gebräuchliche Hilfsmittel, die für die Anwendung von Methoden und Verfahren der Lösungssuche, -findung und -bewertung benötigt werden (z.B. Zeichenwerkzeuge für die Anfertigung von Skizzen, einschlägige Literatur, Konstruktionskataloge, ggf. Materialien zur Anfertigung aufwandsarmer Modelle etc.).

In der vorliegenden Studie standen den Versuchspersonen zusätzlich zur Aufgabenstellung ausreichend Schreib- und Skizzenpapier und Zeichenwerkzeuge zur Verfügung.

Für den Erfolg der Konzeptphase und die Weiterverwendbarkeit der Arbeitsergebnisse dieser Phase im weiteren Entwicklungsfortschritt sind die Lösungsauswahl aufgrund einer Beurteilung der Qualität von Konzeptvarianten sowie deren nachvollziehbare Dokumentation von entscheidender Bedeutung. Deshalb enthielten die Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase einen expliziten Auftrag zur Beurteilung der gefundenen und ausgearbeiteten Konzeptvarianten. Bei der Messung der Lösungsgüte in der Konzeptphase war diese Beurteilung der Lösungsvarianten deshalb ein wichtiges – prozedurales – Kriterium (vgl. 4.4.1.1).

4.1.4.2 Konstruktionsaufträge für die Vorentwurfsphase

Der Übergang von der Konzeptphase zur Vorentwurfsphase ist durch die Festlegung eines weiter zu verfolgenden *Lösungskonzeptes* gekennzeichnet. Ein Lösungskonzept umfasst z.B. (PAHL & BEITZ 1997, S. 215)

- Ergebnisse orientierender Berechnungen,
- skizzenhafte / grobmaßstäbliche Anordnungs- oder Gestaltungsstudien,
- Ergebnisse von Vor- oder Modellversuchen,
- Modelle (Anschauungsmodelle, Simulationsmodelle, simulierende Schaltungen),
- Ergebnisse von Patent-, Literatur- und Marktrecherchen.

Diese sind somit Ausgangsbedingungen für die Entwurfsphase, in der zunächst ein vorläufiger Entwurf generiert werden soll, ohne dass jedoch alle diese Eingangsinformationen notwendigerweise vorhanden sein müssen. Mindestens einige davon müssen jedoch Bestandteile eines Konstruktionsauftrages für die Entwurfsphase unter Laborbedingungen sein.

In der vorliegenden Studie umfasste der Konstruktionsauftrag für die Vorentwurfsphase eine verbale Beschreibung der Problemstellung, eine Skizze des zentralen Wirkprinzips, eine Prinzipskizze des Lösungskonzeptes, eine Liste qualitativer Anforderungen sowie eine Liste auslegungsrelevanter quantitativer Merkmale (Abbildung 4-7).

Technische Universität Berlin
Institut für Maschinenkonstruktion
- Konstruktionstechnik -
DFG 479/68-1, O2

Vpn-Nummer:

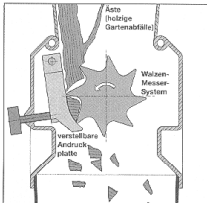
- 2 -

Entwurfsaufgabe O2

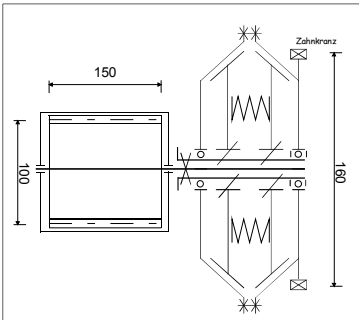
Aufgabenstellung:

Konstruktion eines Gartenhäckslers

Es sind Teile eines Gartenhäckslers zur Zerkleinerung von Holz und Gartenabfällen gemäß dem folgenden Wirkprinzip zu konstruieren.



Über eine leicht zugängliche Öffnung wird Holz und Geäst zugeführt, welches dann im Schneidwerk zerkleinert wird. Der Antrieb des Walze-Messer-Systems erfolgt mit einem Elektromotor. Aus Sicherheitsgründen ist das Schneidwerk mit einer Sicherheitsrutschkupplung ausgerüstet. Das Schneidwerk inkl. der Sicherheitsrutschkupplung ist gemäß folgender Prinzipskizze zu konstruieren. Die Sicherheitsrutschkupplung ist als Doppelkegelkupplung in Gußausführung auszuliegen, Schneidwerkgehäuse / Holzeinwurf als Blechkonstruktion. Die Andruckplatte gehört nicht zum Konstruktionsumfang.



Anforderungen und Konstruktionsmerkmale:

- Einhaltung der Prinzipskizze und der vorgegebenen Daten
- Sicherheitsrutschkupplung in Aufsteckbauweise für ein Wellenende DIN 748 40 x 110
- Trockenkupplung
- die Normalkraft ist über **eine** Feder aufzubringen
- Kupplung nach außen abgedichtet
- alle Lagerungen nach Fest-Loslager-Prinzip, fettgeschmiert mit separaten Dichtungen
- Gehäuse des Gartenhäckslers in Blechausführung, Wälzlager in eingeschraubten Flanschgehäusen in Schweißausführung!

Auslegungsmerkmale:

Antriebswelle (\varnothing_{\min})	40 mm
Teilkreis- \varnothing der Schneidwalze	100 mm
Breite der Schneidwalze	150 mm
Kupplungsreißscheibe \varnothing ausßen	180 mm
Kupplungsreißscheibe \varnothing innen	150 mm
Reibflächenwinkel	45°
Feder (d x D x l _s)	6 mm x 120 mm x 50 mm
Zahnkranz-Teilkreis- \varnothing	160 mm
Zahnkranz Modul m	4 mm

Abbildung 4-7: Beispiel für einen Konstruktionsauftrag für die Vorentwurfsphase²⁴

Bei allen Konstruktionsaufträgen waren zwei Hauptbaugruppen zu entwerfen und zu gestalten, die über eine definierte Schnittstelle (genormte Welle-Nabe-Verbindung) miteinander verbunden waren. Bei dem Beispiel in Abbildung 4-7 mussten z.B. das Schneidwerk des Häckslers und eine Sicherheitsrutschkupplung bearbeitet werden. Diese Struktur wurde gewählt, um in der späteren Vorgehensanalyse verschiedene Vorgehenstypen eindeutig voneinander abgrenzen zu können (vgl. Kapitel 4.3.2).

Merkmale des situativen Kontextes der Entwurfsphase wurden durch zur Verfügung stellen gebräuchlicher Hilfsmittel, die für die Anwendung von Methoden und Verfahren der Lösungskonkretisierung, Geometrieerzeugung und Berechnung benötigt werden (Papier und Zeichenwerkzeuge für die Anfertigung technischer Zeichnungen, Konzeptpapier, Handbücher, Maschinenelementekataloge), nachgebildet.

4.1.4.3 Standardisierung der Konstruktionsaufträge

Konstruktionsaufträge können sich hinsichtlich der sich aus ihnen ergebenden Anforderungen an den Bearbeiter stark unterscheiden. Um in der vorliegenden Studie die Untersuchungsergebnisse über die drei Ausbildungsniveaus vergleichen zu können, müs-

²⁴ Sämtliche Vorentwurfsaufgaben sind im Anhang (8.1.2) dokumentiert.

sen die Konstruktionsaufträge jedoch trotz unterschiedlicher Einkleidung vergleichbar sein. Die Homogenität der Konstruktionsaufträge wurde deshalb mit Hilfe des von SCHRODA 2000 entwickelten Verfahrens zur Anforderungsanalyse von Konstruktionsaufträgen überprüft. Im Zentrum dieses Ansatzes steht eine Taxonomie von Merkmalen, die die Anforderungshöhe von Konstruktionsaufträgen in sechs Kategorien beschreibt (SCHRODA 2000, vgl. auch Kapitel 2.3.1):

- *widersprüchliche Ziele*, definiert durch die Anzahl der Ziele, die Anzahl der widersprüchlichen Ziele und die Stärke der Widersprüche,
- *Komplexität*, definiert durch die Anzahl von Teilfunktionen, die Anzahl von Verknüpfungen zwischen diesen und die Stärke der Verknüpfungen,
- *Intransparenz*, definiert durch die zur Verfügung stehenden Informationen zu Ausgangs- und Randbedingungen,
- *Freiheitsgrade*, definiert durch die Anzahl möglicher Lösungsvarianten und die Anzahl möglicher Lösungswege,
- *Dynamik*, definiert durch die Veränderlichkeit der Ausgangsbedingungen, die Kalkulierbarkeit der Wirkung von Entscheidungen und Eingriffen und die Einwirkung äußerer Größen,
- *erforderliches Wissen*, definiert durch spezifisches Sachwissen, problemspezifische Vorgehensweisen und allgemeine Lösungsstrategien, die für die Auftragsbearbeitung bekannt sein müssen.

Die Messung dieser Beurteilungskategorien ist in einem umfassenden Fragebogen operationalisiert, dessen Auswertung auf eine Beurteilung der Anforderungshöhe eines Konstruktionsauftrags in diesen Kategorien auf einer Ordinalskala (1-5) führt. Zudem wird ein Gesamtwert abgeleitet, der es erlaubt, Konstruktionsaufträge den Kategorien Variantenkonstruktion, Anpassungskonstruktion und Neukonstruktion zuzuordnen.

In der vorliegenden Studie wurden die je drei eingesetzten Konstruktionsaufträge für die Konzept- und Vorentwurfsphase von mehreren Konstruktionsexperten beurteilt und sämtlich als Anpassungskonstruktionen mit mittlerer Anforderungshöhe klassifiziert. Dabei unterscheiden sich die Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase in allen Merkmalen der Anforderungshöhe und auch im Gesamtwert nicht signifikant (Abbildung 4-8).

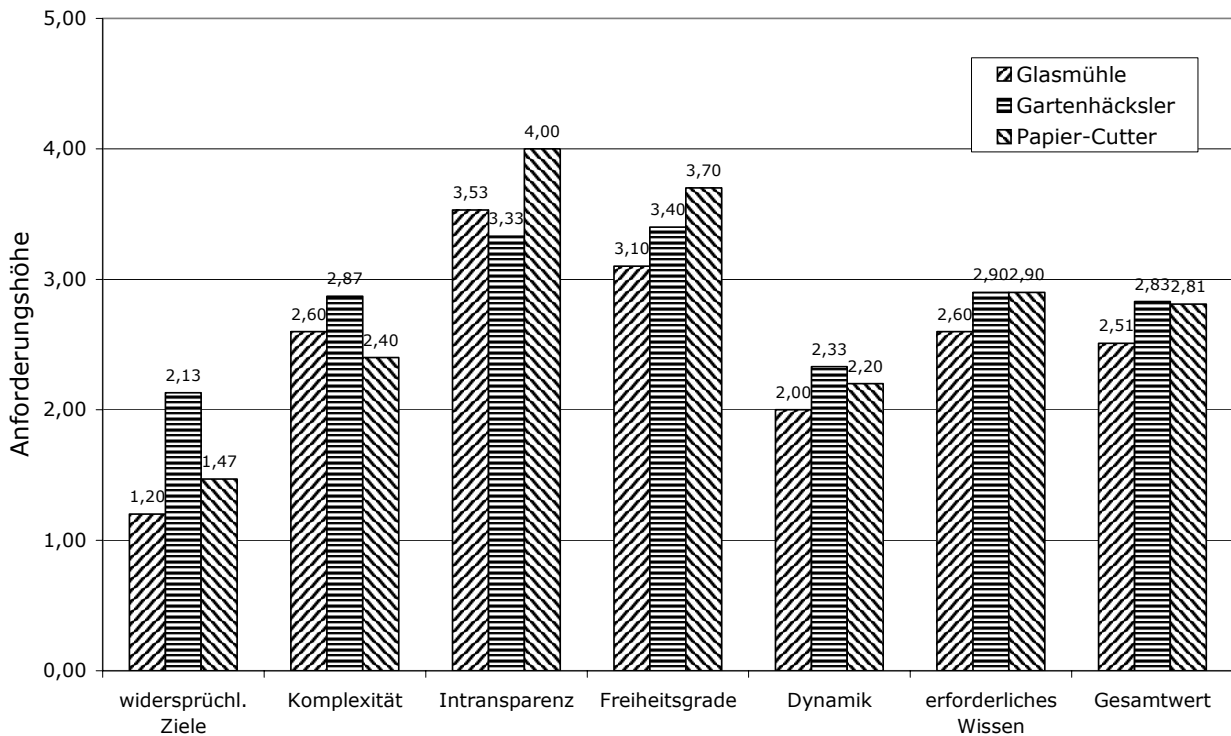


Abbildung 4-8: Mittelwerte (über alle Beurteiler) der Anforderungshöhe der Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase

Der Gesamtwert liegt mit 2,5 bis 2,8 Bewertungspunkten genau im Mittel der maximalen Anforderungshöhe von 5 Bewertungspunkten. Lediglich die Merkmale „Intransparenz“ und „Freiheitsgrade“ erhalten hier höhere Werte, was bei einem Konstruktionsauftrag aus der Konzeptphase auch beabsichtigt ist. Die mittleren Einschätzungen der Anforderungshöhe unterscheiden sich über die sechs Kategorien hinweg für die drei Konstruktionsaufträge aus der Konzeptphase nicht signifikant (einfaktorielle ANOVA: $F=0,42$, $df=2$, $p=0,67$).

Für die Konstruktionsaufträge aus der Vorentwurfsphase ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 4-9).

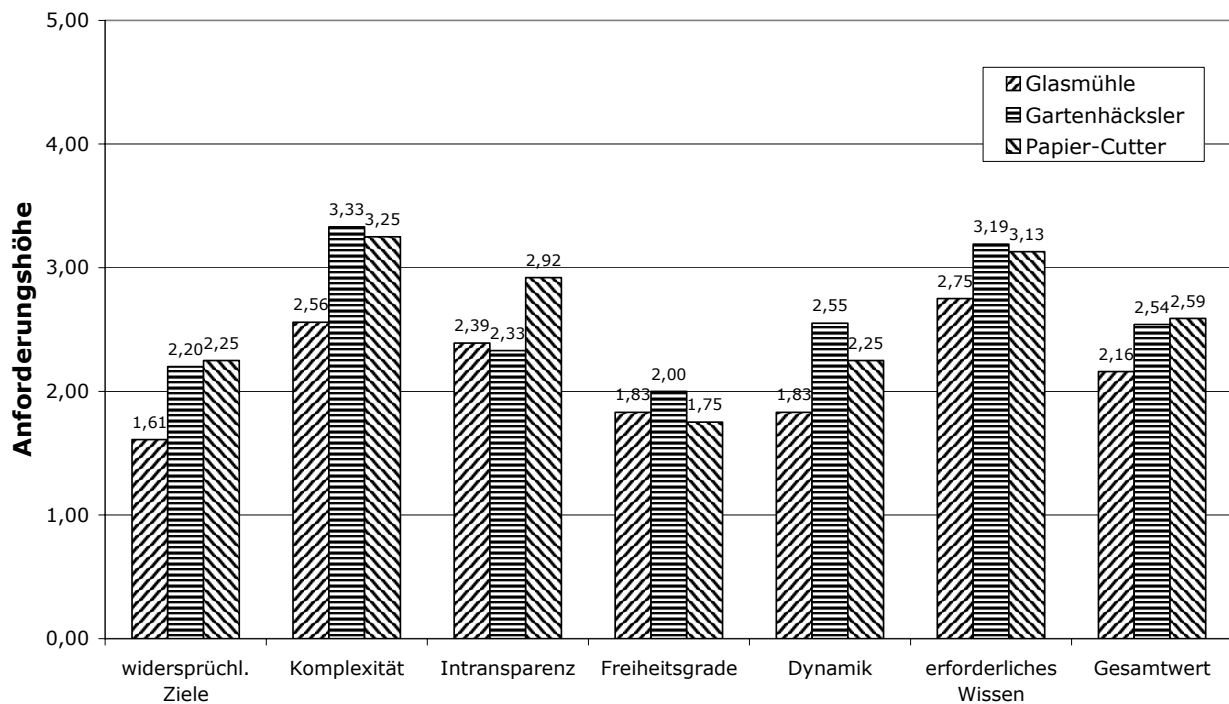


Abbildung 4-9: Mittelwerte (über alle Beurteiler) der Anforderungshöhe der Konstruktionsaufträge für die Vorentwurfsphase

Der Konstruktionsauftrag „Glasmühle“ wurde hier mit einer insgesamt etwas niedrigeren Anforderungshöhe eingeschätzt, jedoch nicht in einem empirisch relevanten Umfang. auch hier gibt es keine signifikanten Unterschiede in der eingeschätzten Anforderungshöhe über die sechs Kategorien (einfaktorielle ANOVA: $F = 1,79$, $df = 2$, $P = 0,2$).

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass es sich für die Konzept- und für die Vorentwurfsphase jeweils um Konstruktionsaufträge gleicher Art und gleicher Anforderungshöhe handelte.

Die Untersuchung der Beurteilerübereinstimmung ergab zudem, dass fünf der sechs Konstruktionsaufträge von den Beurteilern signifikant übereinstimmend beurteilt wurden, lediglich der Konstruktionsauftrag „Konzept eines Gartenhäckslers“ verfehlt die Signifikanzgrenze knapp. Auch bei der nachträglichen Auswertung der Untersuchungsergebnisse konnte kein signifikanter Einfluss der Versuchsaufgaben auf die Lösungsgüte gefunden werden (für weitere Details dieser Untersuchung vgl. PIETZCKER 2004).

4.2 Methodik für die Vorgehensbeobachtung

In der Konstruktionsforschung kommt der Handlungsbeobachtung besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu manuell betonten Tätigkeiten, wie sie in der industriellen Arbeitsanalyse oft anzutreffen sind, ist die Konstruktionstätigkeit in den frühen Phasen der direkten Beobachtung nur selten zugänglich. Man muss deshalb aus den Beobachtungen auf die eigentlich interessierenden „internen“ kognitiven Aktivitäten hinter dem „externen“ Verhalten schließen. Es ist deshalb sicherzustellen, dass die eingesetzten Verfahren das gesuchte Verhalten auch wirklich erfassen können. Dazu ist es notwendig, zu definieren, welche beobachtbaren Handlungen welcher Kategorie kognitiver Aktivität

zugeordnet werden. Solche Schlussfolgerungen sind zwar mit einiger Unsicherheit behaftet, können jedoch durch Analogiebetrachtungen mit abgesicherten kognitionspsychologischen Experimenten und durch retrospektive Befragung der Versuchspersonen validiert werden.

Für die systematische Handlungsbeobachtung stehen verschiedene Klassen von erprobten Beobachtungsmethoden zur Verfügung (vgl. BORTZ & DÖRING 2002, S. 267ff.):

- teilnehmend oder nicht teilnehmend;
- offen oder verdeckt;
- durch einen oder mehrere Beobachter;
- mit oder ohne apparative Hilfe;
- als Selbst- oder Fremdbeobachtung;
- kontinuierlich oder diskontinuierlich.

Einen Vorschlag für eine Auswahl von Erfassungsmethoden für komplexe Handlungssituationen macht auch v. D. WETH 2001 (S. 56). Er unterscheidet bei komplexen Handlungssituationen drei Beobachtungsebenen:

- die Auftragsebene,

die die objektiven Voraussetzungen für die Aufgabenkomplexität umfasst. Sie kann mit Mitteln der Arbeits- und Organisationsanalyse wie z.B. durch die Beschreibung von Arbeitsaufträgen, Arbeitsplatz, Arbeitsmitteln, organisatorischem Umfeld etc. untersucht werden.

- die Anforderungsebene²⁵,

die die „Verfügbarkeit und (das) Auftreten von Problemlösestrategien und komplexitätsreduzierenden Maßnahmen“ (v. D. WETH 2001 S.56) umfasst. Hierzu gehören die stabilen und die dynamischen Voraussetzungen für die Bewältigung einer komplexen Handlungssituation. Untersucht werden kann diese Ebene durch Dokumentenanalysen, Verhaltensbeobachten oder Eignungstests.

- die Erlebensebene,

die das subjektive Erleben von Komplexitätsfaktoren d.h. die subjektive Einschätzung der Aufgabe durch die Versuchspersonen umfasst. Diese Ebene kann durch eine Vielzahl von Methoden untersucht werden, z.B. durch Einzel- oder Gruppeninterviews, die Dokumentation „lauten Denkens“ oder durch standardisierte psychologische Messverfahren. wie z.B. den „NASA Task Load Index“ (HART & STAVELAND 1988).

In der vorliegenden Untersuchung wird die Auftragsebene durch die Untersuchung der Anforderungshöhe der Konstruktionsaufträge abgedeckt (vgl. Kapitel 4.1.4); die subjek-

²⁵ Hier wird der Begriff „Anforderung“ im Sinne der kognitiven Psychologie gebraucht und bezeichnet das kognitive Anforderungsniveau komplexen Handelns, nicht die Anforderungshöhe der konkreten Aufgabe.

tive Erlebensebene wird mit Hilfe der Methode der Strukturlegetechnik untersucht (vgl. Kapitel 4.1.2). Im Mittelpunkt steht jedoch die Anforderungsebene, auf der vor allem die Verfügbarkeit und der Einsatz individueller Vorgehensstrategien erfasst werden soll. Hierfür wurde ein valides Beobachtungsinstrumentarium entwickelt.

Das Ziel jeder Beobachtungsmethode muss sein, das tatsächliche Vorgehen der Versuchspersonen möglichst nicht zu beeinflussen, vor allem nicht in Richtung auf die der Untersuchung zugrunde liegenden Hypothesen. Zudem muss vermieden werden, dass durch die Beobachtungsmethode Artefakte in den gewonnenen Daten erzeugt werden, die Vorgänge dokumentieren, die in der Realität gar nicht vorhanden waren. Besondere Probleme weist in diesem Zusammenhang die Selbstprotokollierung von Aktivitäten durch die Versuchspersonen, insbesondere in Verbindung mit der oft eingesetzten Methode des lauten Denkens auf. Dies gilt vor allem für Untersuchungen in der Konzeptphase. „Verbalizing knowledge during designing may interfere with the task, or it may alter the expert’s usual approach. [...] In some areas, such as the study of conceptual mechanical design, the thinking aloud methodology may actively impede the designer’s thinking. The designer may be literally unable to think and talk at the same time, thereby forgetting to verbalize.” (WALDRON & WALDRON 1996A, S. 26)

AKIN 1979 (S. 115) fasst die Kritik an solchen Selbstprotokollierungstechniken bei der komplexen Vorgehensanalyse zusammen:

- a) “Often subjects are asked to verbalize their behaviors during protocol experiments. Subjects introspecting about their actions have been shown to be in error, in many studies.
- b) The thought process, being much faster than motor responses, cannot be fully reflected through the motor behaviors of subjects.
- c) Due to the magnitude of the analysis required to understand the average protocol data, very small numbers of subjects are used in each experiments.
- d) There are usually gaps (or periods of silence) found in most protocols, which can be accounted for by proposing a complete lack of cognitive activity.”

Akin hält Techniken der Selbstprotokollierung trotzdem für die komplexe Handlungsanalyse für geeignet, betont jedoch die Notwendigkeit, durch geeignete Maßnahmen die negativen Effekte dieser Techniken zu vermeiden und die notwendigen Unvollständigkeiten der erhobenen Daten bei der Auswertung zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 4.3).

Um die Vorgehensbeeinflussung durch das Beobachtungsinstrumentarium zu minimieren wurde in der vorliegenden Studie eine

- diskontinuierliche,
- nicht teilnehmende,
- offene,

- apparativ gestützte

Fremdbeobachtung der Versuchspersonen durch die Versuchsleiter als Beobachtungsinstrumentarium eingesetzt.

4.2.1 Vorgehensbeobachtung in der Konzeptphase

Für das erwartete Vorgehen beim Bearbeiten des Konstruktionsauftrags für die Konzeptphase ist es charakteristisch, dass die Versuchspersonen mit verschiedenen Mitteln an der Lösung der Aufgabe arbeiten. Die Klärung der Aufgabenstellung und der Anforderungen findet teilweise auf dem Aufgabenblatt, z.B. durch Anmerkungen und Unterstreichungen, statt. Die Sammlung von Lösungsideen und deren weitere Bearbeitung und Konkretisierung werden in textlicher Form und in Skizzen oder orientierenden Berechnungen auf Konzeptpapier durchgeführt. Dabei ist ein ständiger Wechsel zwischen einzelnen Lösungsideen, Konzeptblättern und Notizen die Regel.

Eine Fotodokumentation²⁶ des aktuell erreichten Arbeitsfortschritts in 5-Minuten-Intervallen wurde zur Unterstützung des retrospektiven Nachvollziehens des individuellen Vorgehens, das jedoch vor allem auf der Analyse der abschließenden Ergebnisse der Auftragsbearbeitung basierte, vorgenommen (Abbildung 4-10). Unterstützt wurde diese Erfassungsmethode durch viermaligen Wechsel der Stifffarbe durch die Versuchspersonen im Verlauf der 60-minütigen Auftragsbearbeitung.

²⁶ Diese Methode konnte erst auf den Ausbildungsniveaus A2 und A3 eingesetzt werden, da zum Untersuchungszeitpunkt für das Ausbildungsniveau A1 noch keine digitale Fototechnik zur Verfügung stand und der Einsatz herkömmlicher Fototechnik mit vertretbarem finanziellem Aufwand nicht möglich war. Da für die Vorgehensanalyse die Art und nicht die Reihenfolge der beobachteten Arbeitsschritte im Vordergrund stand (vgl. Kapitel 4.3.1), hatte dieses keinen Einfluss auf die Verwendbarkeit der Ergebnisse aus der Baseline A1.

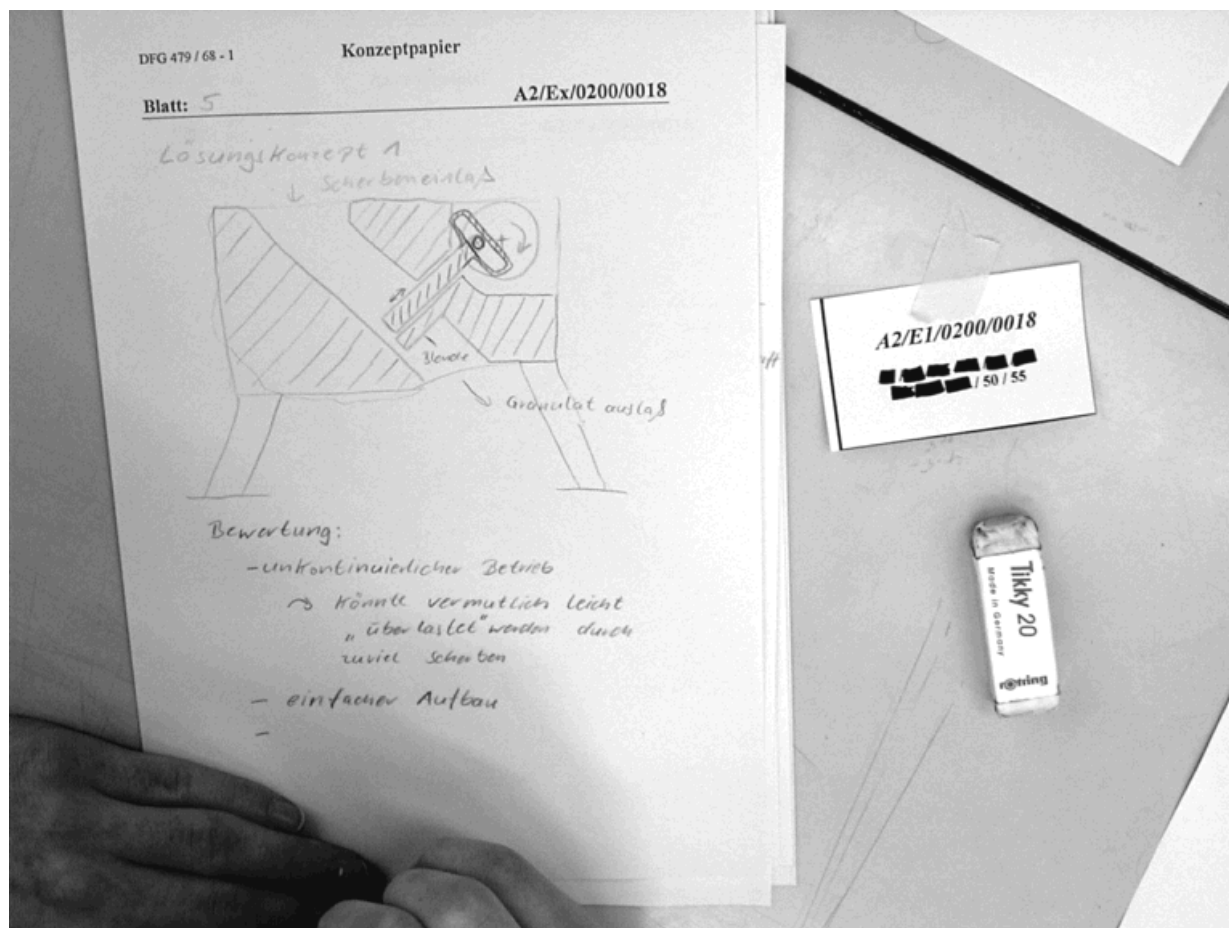


Abbildung 4-10: Beispiel für die Fotodokumentation des Arbeitsfortschritts bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags für die Konzeptphase

Eine Störung der Versuchspersonen durch diese Methoden war gering, da der Arbeitsplatz von der freien Seite im vorgefundenen Zustand fotografiert wurde, ohne dass die Arbeit unterbrochen werden musste.

4.2.2 Vorgehensbeobachtung in der Vorentwurfsphase

Für die mit 3,5 Stunden erheblich längere Bearbeitungsdauer bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags aus der Vorentwurfsphase wurde ein mindestens abschnittsweise konstanteres, d.h. episodenhaftes, Vorgehen unter Verwendung verschiedener Arbeitsmittel erwartet. Aktivitäten wie das Lesen und Analysieren der Aufgabenstellung, textliche, numerische und skizzierende Arbeitsschritte auf Konzeptpapier, Konkretisierung der Lösung auf dem Zeichenblatt mit gelegentlichen Unterbrechungen zum Orientieren am Aufgabenblatt, Skizzieren und Berechnen auf Konzeptpapier sind für diese Phase charakteristisch.

Um diese Aktivitäten zu dokumentieren, wurden während der Auftragsbearbeitung in 10-Minuten-Intervallen²⁷ Fotos vom aktuellen Stand des Arbeitsfortschritts aufgenom-

²⁷ Da bei der Untersuchung auf Ausbildungsniveau A1 noch keine digitale Fototechnik zur Verfügung stand, konnten hier mit herkömmlicher Fototechnik aus Kostengründen nur 20-Minuten-Intervalle realisiert werden.

men (Abbildung 4-11). Das umfasste sowohl das eigentliche Arbeits- bzw. Zeichenblatt als auch ggf. verwendetes Konzeptpapier.

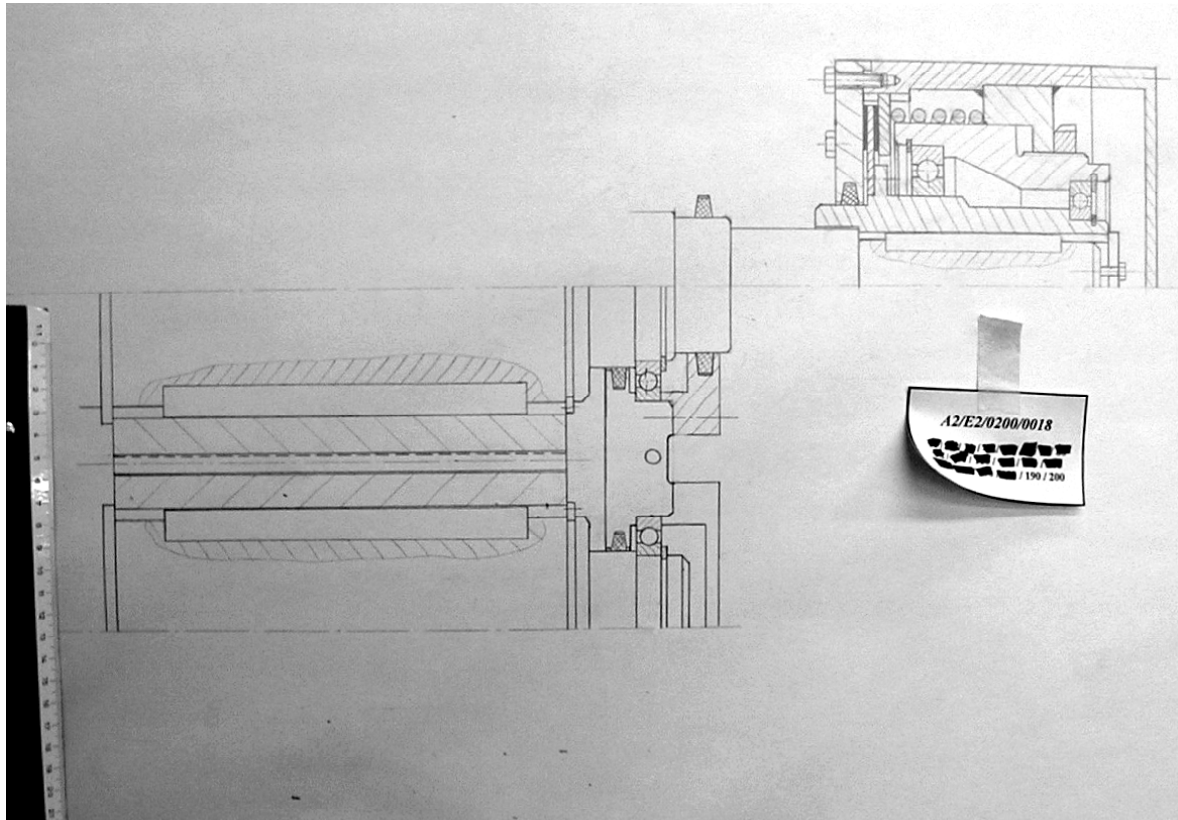


Abbildung 4-11: Beispiel für die Fotodokumentation des Arbeitsfortschritts bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags für die Vorentwurfsphase

Im gleichen Intervall wurden die Versuchspersonen gebeten, auf einem offenen Selbst-aufschreibebogen ihren Arbeitsfortschritt zu dokumentieren (Abbildung 4-12).

Technische Universität Berlin		DFG 479/68-1 Technische Universität Dresden		
Protokollblatt – Nr.:.....		VP-Nummer:.....		
Tätigkeitsprotokoll Konstruktion				
<i>Uhrzeit</i>	<i>bearbeitete Baugruppe / Teil / Wirkprinzip</i>	<i>Tätigkeit (I)</i>	<i>Tätigkeit (II)</i>	<i>benutzte Hilfsmittel</i>
hh.mm		z.B.: Anforderungen klären, Gestalten (fein/ grob), Berechnen, Experimentieren, Beurteilen, Auswählen, graphisch Darstellen (zeichnen, skizzieren, radieren), textlich darstellen	z.B.: Informieren, Strukturieren, Prüfen, Ändern, Organisieren, Kommunizieren	z.B.: Schmierzettel, Literatur, Zeichenwerk- zeuge
		Konstruktionsaufgabe erhalten:		

Abbildung 4-12: Selbstaufschreibebogen für die unterstützende Vorgehenserfassung bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags aus der Vorentwurfsphase (Ausriss)

Bei diesem Beobachtungsdesign für die Konzept- und die Vorentwurfsphase konnten reaktive Effekte durch den Beobachter überwiegend ausgeschlossen werden. Weder durch spezifisches Verhalten der Versuchleiter, noch durch bestimmte Dokumente wurde den Versuchspersonen nahe gelegt, im Sinne einer sozialen Erwünschtheit zu agieren und die Konstruktionsaufträge in Richtung auf die Forschungshypothesen zu bearbeiten. Die Versuchssituation war mit insgesamt ca. sechs Stunden – für den gesamten Versuchsablauf, bestehend aus Konzept- und Vorentwurfsteil, den verschiedenen weiteren Untersuchungsbausteinen und Arbeitspausen (vgl. Abbildung 4-4, S. 123) – so lang, dass eine Gewöhnung an die Arbeit unter Beobachtung schnell erfolgte. Dieses wurde

in Nachbefragungen von den Versuchspersonen geschildert, die ohne Ausnahme davon berichteten, dass sie die Aufgabenbearbeitung sehr schnell vollständig in Anspruch genommen und dass die Beobachtung diese Inanspruchnahme kaum beeinträchtigt habe.

4.3 Methodik für die Vorgehensanalyse

Ein grundsätzliches Problem der Vorgehensanalyse besteht darin, dass die Beobachtungsergebnisse aufgrund der prinzipiell unvollständigen Informationen, die aus der Tätigkeitsbeobachtung über kognitive Aktivitäten gewonnen werden können, in jedem Falle mehrdeutig sind und damit Interpretationsspielräume offen lassen. Vor allem im Bereich der Konstruktionswissenschaft mit ihren wissensreichen, komplexen und dynamischen Problemen und einer fehlenden umfassenden Theorie, führt das zu Problemen. AKIN 1979 hat auf diese Problematik hingewiesen und schlägt vor, die Reliabilität der Vorgehensinterpretation durch die zusätzlichen Gütekriterien *Plausibilität* und *Konsistenz* zu erhöhen. „The task of identifying plans and demonstrating their experimental reliability is a difficult one. There is no precedence or scientific theory to facilitate this task. Based on general knowledge two criteria can be proposed as measures of reliability in design protocol analysis: a) plausibility and b) consistency.

Plausibility is necessary in making ‘better’ inferences in identifying design-plans. The basic logical tool in inferring design plans from protocols is induction. The only insurance one has in correctly inferring a rule (plan) from a given case (input information state) and a result (output information state) is knowledge of what is plausible based on past experience.” (AKIN 1979, S. 116)

Akin illustriert das Plausibilitätskriterium mit einem Beispiel: Beobachtet man in einem Experiment eine Versuchsperson, die nach einem Lineal fragt (Input), dieses erhält und anschließend damit eine Messung in einer Zeichnung vornimmt (operation), so kann man daraus z.B. schlussfolgern, dass die Versuchsperson das Ziel verfolgte, etwas auszumessen, daraufhin den Plan entwickelte, ein Lineal zu erhalten, dieses an der gewünschten Stelle der Zeichnung anzulegen und dann das gewünschte Maß abzulesen. Man könnte allerdings alternativ auch schlussfolgern, dass die Versuchsperson sich zunächst am Rücken kratzen wollte und deshalb den Plan entwickelte, ein Lineal zu erhalten. Dieser Plan wurde dann spontan geändert aufgrund der einfachen Tatsache, dass das Lineal zur Verfügung stand und es nahe liegend war, damit etwas auszumessen. Beide Schlussfolgerungen sind aus den Beobachtungen möglich, die erste ist jedoch offenkundig plausibler als die Zweite.

Bei der Beobachtung realer Konstruktionsprozesse ist die Unterscheidung zwischen plausiblen und weniger plausiblen Interpretationen beobachteter Vorgänge allerdings meist weit weniger eindeutig, so dass weitere Gütekriterien zur Anwendung kommen müssen, z.B. die Konsistenz der Interpretationen. „Consistency criteria are necessary for providing an independent test for measuring reliability. It requires that the proposed plans are not inconsistent with a) other plans identified in the present task, b) tactics and strategies compiled in other studies of human information processing, and c) plans iden-

tified at different times or with different subjects.” (AKIN 1979, S. 116) Dieses Konzept der Konsistenz erweitert das bekannte Gütekriterium der Reliabilität.

Für die Auswertung der in der vorliegenden Studie erhobenen Daten waren diese beiden zusätzlichen Kriterien von entscheidender Bedeutung. Für die Vorgehensanalyse in der Vorentwurfsphase lagen z.B. zu jedem erfassten Zeitintervall ein Foto des zu diesem Zeitpunkt erreichten und extern beobachtbaren Arbeitsfortschritts sowie ein mit diesem Zeitpunkt korrelierender Protokolleintrag im Selbstaufschreibebogen vor. Basierend auf diesen beiden Informationen musste analysiert und interpretiert werden, welche Aktivitäten die Versuchsperson im abgelaufenen Zeitintervall ausgeführt hatte. Diese Interpretation baute sehr stark auf Plausibilitäts- und Konsistenzüberlegungen auf. Zur Unterstützung dieses Interpretationsschrittes wurde eine Liste von Merkmalen angelegt, die auf bestimmte hypothetische Basisoperationen verwiesen. Mit Hilfe dieser Merkmalsliste wurden die beobachteten Aktivitäten kodiert und mit Hilfe systematischer Erfassungsschemata dokumentiert (vgl. Kapitel 4.3.2). Anschließend konnten diese Daten mit Hilfe statistischer Methoden weitergehend analysiert werden.

4.3.1 Vorgehensanalyse in der Konzeptphase

Die für die Bearbeitung des Konstruktionsauftrags aus der Konzeptphase zur Verfügung gestellte Bearbeitungszeit war mit 60 Minuten relativ kurz bemessen, so dass hier neben der Fotodokumentation während des Versuches keine weiteren Protokolldaten erhoben wurden. Die Vorgehensanalyse basiert deshalb vor allem auf den von den Versuchspersonen erzielten Ergebnissen, unterstützt durch die Fotodokumentation als Interpretationshilfe in Zweifelsfällen.

Um aus diesen vorliegenden Dokumenten möglichst zuverlässig die Basisoperationen aus dem in 3.4.1 definierten Vorgehensmodell zu identifizieren, wurden in der vorliegenden Studie diesen Hauptarbeitsschritten unter Berücksichtigung der Laborsituation und des konkreten Konstruktionsauftrags

- Konstruktionsmethoden, die von den Versuchspersonen erwartungsgemäß eingesetzt werden können,
- Dokumentenarten, die die Versuchspersonen erwartungsgemäß erzeugen,

zugeordnet. Mit Hilfe dieser Zuordnungen wurden ein Erfassungsschema und eine auf Auswertbeispielen basierende Kodierungshilfe (vgl. Anhang 8.2.1) erstellt, mit deren Hilfe das Vorgehen bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen in der Konzeptphase kategorisiert wurde (Abbildung 4-13).

Schema zur Erfassung des Vorgehens bei der Lösung der Konzeptaufgabe

A2, VP-Nr.: _____

Phase	Tätigkeit	Methode	mögl. Arbeitsergebnis	+/0/-
Information	Aufgabenstellung klären, Anforderungen formulieren	Merkmallisten	Anforderungsliste	
Definition	Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme	gedankliche Abstraktion und Problemformulierung	Liste von Hauptproblemen	
		systematische Erweiterung der Problemformulierung	vom vorliegenden Konstruktionsauftrag abstrahierte (Teil-) Problemformulierung	
	Aufstellen von Funktionsstrukturen (Gesamtfunktion / Teilfunktionen)	Aufgliedern in Teilfunktionen	Liste wesentlicher Funktionen, Funktionsstruktur	
Kreation	Suchen nach Wirkprinzipien für Teilfunktionen	Analyse bekannter natürlicher und technischer Systeme	expliziter Bezug auf schon realisierte Lösungen	
		Analogiebetrachtungen	expliziter Bezug auf verwandte Lösungen	
		systematische Untersuchung des physikalischen Zusammenhangs	Angabe von Materialeigenschaften, auslegungsrelevanten physikalischen Merkmalen	
		Ordnungsschemata	(geordnete) Liste von Wirkprinzipien, Prinzipskizzen	
	Wirkprinzipien zu prinzipiellen Lösungsvarianten / Wirkstruktur kombinieren	systematische Kombination	Ordnungsschemata, morphologischer Kasten	
	Lösungsvarianten darstellen (Skizzieren / Grobgestalten)	vereinfachte Dimensionierung	Abschätzung, Berechnung	
		intuitiv betonte Verbesserung durch Skizzen	Prinzipskizzen, grobmaßstäbliche Entwurfsskizzen ggf. mit Erläuterungen	
	Lösungsvarianten vorläufig beurteilen und auswählen	Auswahlliste	Rangfolge der Güte/ Wertprofile/ verbal formulierte Schlussfolgerungen	
	Lösungsvarianten konkretisieren / überarbeiten	Skizzieren	Prinzipskizzen der Gesamtlösung, grobmaßstäbliche Entwurfsskizzen	
		Funktion verbal beschreiben	verbale Beschreibungen der Lösungsvarianten	
Beurteilung/ Entscheidung	s. Beurteilungsbogen „Konzeptbewertung“			
Anmerkungen/ sonstiges				

Abbildung 4-13: Erfassungsbogen für die Vorgehensfassung bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Die Erfassung des Vorgehens erfolgte mittels einer dreiwertigen Skala, bei der für die drei eher lösungserzeugenden Teilphasen *Information*, *Definition* und *Kreation* das Auftreten einer Basisoperation als

- Basisoperation wurde durchgeführt (2 Punkte),
- Basisoperation wurde zum Teil durchgeführt (1 Punkt),
- Basisoperation wurde nicht durchgeführt (0 Punkte)

kodiert wurde. Für die abschließende Teilphase „Beurteilung/ Entscheidung“ war in diesem Schema keine Kodierung vorgesehen, da das Vorgehen in dieser Phase Gegenstand einer genaueren Analyse (vgl. Kapitel 4.4.1.1) war.

Auf Basis der so gewonnen Daten konnten quantitative Datenanalysen für das Vorgehen bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen in der Konzeptphase vorgenommen werden.

4.3.2 Vorgehensanalyse in der Vorentwurfsphase

Zur Analyse des Vorgehens der Versuchspersonen bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags aus der Vorentwurfsphase standen aufgrund der Fotodokumentation und der Selbstprotokollierung detaillierte Verlaufsdocuments zur Verfügung. Auf der Basis dieser Dokumente konnte für jedes Beobachtungsintervall eine Zuordnung des realisierten Vorgehens zu den im Vorgehensmodell für die Vorentwurfsphase definierten Basisoperationen (vgl. Kapitel 3.4.2) vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wurden Vorgehensmatrizen verwendet, die den zeitlichen Verlauf des beobachteten Vorgehens abbilden (Abbildung 4-14). Die Kodierung der erfassten Daten wurde durch einen Kodierungsleitfaden unterstützt (vgl. Anhang 8.2.2).

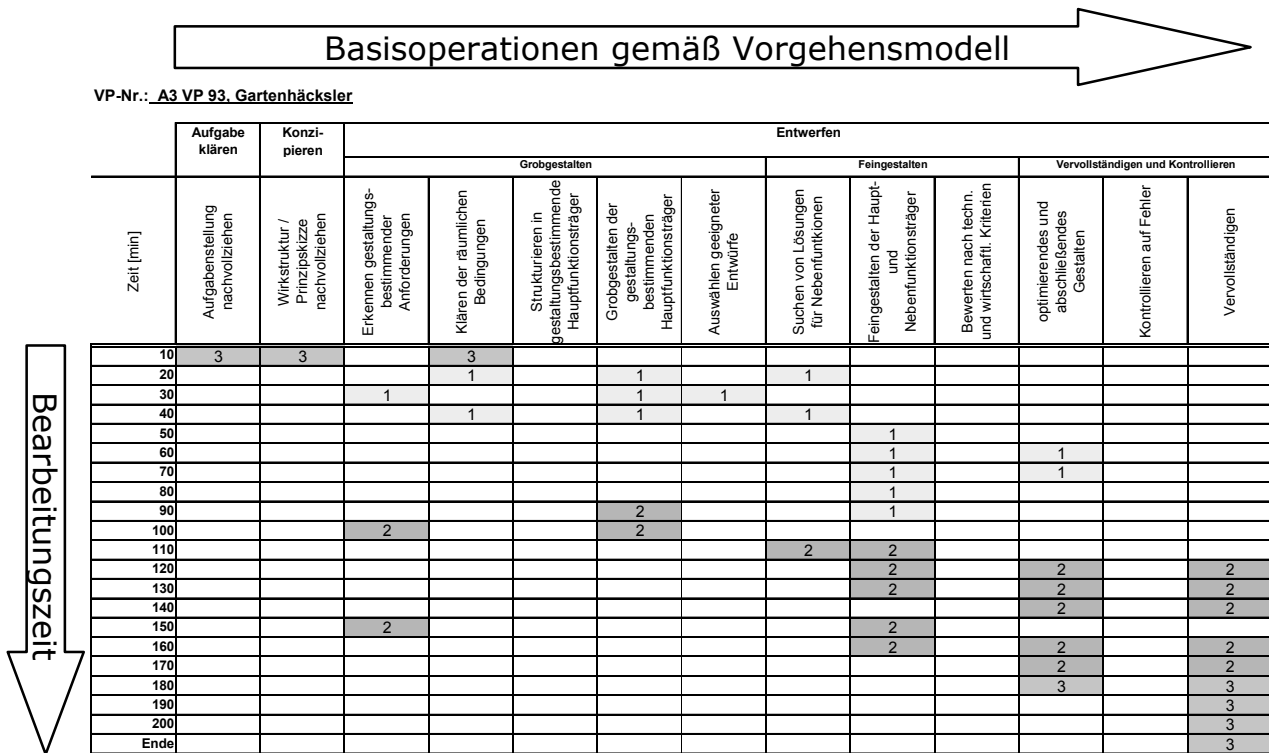


Abbildung 4-14: Vorgehensmatrix zur Analyse des Vorgehens bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

In einer Vorgehensmatrix wird die fortlaufende Bearbeitungszeit zeilenweise entsprechend dem Beobachtungsintervall aufgetragen. Die gemäß dem Vorgehensmodell zu erwartenden Bearbeitungsschritte sind spaltenweise aufgetragen. Auf diese Weise ist es möglich, den Arbeitsfortschritt im jeweiligen Bearbeitungsintervall zu kategorisieren. Da innerhalb eines Beobachtungsintervalls auch mehrere Basisoperationen auftreten können, ist die Belegung von mehreren Feldern pro Matrixzeile möglich. Dieses ist bei einer diskontinuierlichen Beobachtung mit vorab definiertem Beobachtungsintervall unvermeidlich.²⁸

In der vorliegenden Studie wurde beim Einsatz der Vorgehensmatrizen zusätzlich in jedem Beobachtungsintervall dokumentiert, welche der beiden Hauptbaugruppen des Konstruktionsauftrags von der Versuchsperson bearbeitet wurde (vgl. die Nummerneinträge und die farbliche Unterscheidung in Abbildung 4-14).

Um die Daten einer quantitativen Analyse zugänglich zu machen, wurde ein von FRICKE 1993 vorgestelltes Verfahren verwendet, das geeignet ist, den in Vorgehensmatrizen erfassten Vorgehensablauf in Bezug auf die dabei vorgenommenen Vor- und Rücksprün-

²⁸ In der parallel durchgeführten Querschnittstudie, in der das Vorgehen berufserfahrener Konstrukteure untersucht wurde, wurde eine softwaregestützte, diskontinuierliche Vorgehenserfassung ohne vorab definierte Beobachtungsintervalle eingesetzt, bei der jeder Übergang zwischen zwei Basisoperationen erfasst wird (vgl. BENDER ET AL. 2002C). Hier treten keine Mehrfachbesetzungen auf. Dieser Aufwand kann bei Gruppenversuchen und hohen Fallzahlen jedoch nicht getrieben werden.

ge zu analysieren und das Ergebnis dieser Analyse in einer Übergangsmatrix darzustellen (FRICKE 1993, S. 56-58, Abbildung 4-15).

DFG/KMA
A3, Entwurfsaufgabe
VP-Nr.: 93

Übergang ohne Baugruppenwechsel

Übergang verbunden mit Baugruppenwechsel

		Ziel															
		A	B	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	E1	E2	E3			
Start	A			1													1
	B						1										1
	C1								2								3
	C2						1			2							3
	C3																0
	C4				1					1	3						5
	C5					1											1
	D1				1												3
	D2				1					1							10
	D3																0
	E1																8
	E2																0
	E3																8
			0	1	3	3	0	5	1	3	10	0	8	0	9	Σ	
																43	
															Σ	43	

Abbildung 4-15: Übergangsmatrix zur Analyse des Vorgehens bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase (gleicher Fall wie in Abbildung 4-14)

Hierbei werden die hypothetischen Basisoperationen jeweils zeilen- und spaltenweise in einer quadratischen Matrix aufgetragen. Ausgehend von der ersten beobachteten Basisoperation im ersten Beobachtungsintervall (Startpunkt des Übergangs) wird dann im nächsten Beobachtungsintervall die nächste beobachtete Basisoperation (Endpunkt des Übergangs) ermittelt. Hieraus resultiert ein Eintrag in der Übergangsmatrix in der Zelle, deren Zeilenindex dem Startpunkt und deren Spaltenindex dem Endpunkt entspricht. Dieses wird dann für alle weiteren Vorgehensschritte wiederholt. Dabei können Einträge auftreten:

- auf der Hauptdiagonalen der Übergangsmatrix, was einer Stagnation im Vorgehen entspricht;
- oberhalb der Hauptdiagonalen der Übergangsmatrix, was einem Vorwärtsschreiten im Prozess entspricht;
- unterhalb der Hauptdiagonalen der Übergangsmatrix, was einem Rückwärtsschreiten im Prozess entspricht.

Hat man alle im beobachteten Vorgehen enthaltenen Übergänge auf diese Weise eingetragen, kann man die Häufigkeit der identifizierten Übergänge und die jeweilige Sprungweite zwischen zwei Basisoperationen – gemessen am präskriptiven Vorgehensmodell – direkt ablesen.

In der vorliegenden Studie wurde dieses Instrument dahingehend verfeinert, dass auch hier diejenigen Übergänge, bei denen die bearbeitete Hauptbaugruppe wechselte, von denjenigen, bei denen diese nicht wechselte, unterschieden werden konnte. Dabei wurden Übergänge der Sprungweite 0 – d.h. Einträge auf der Hauptdiagonalen – nur berücksichtigt, wenn sie mit einem Baugruppenwechsel verbunden waren. Übergänge mit Baugruppenwechsel bedeuten eine objektorientierte Änderung des Vorgehens im gleichen Vorgehensschritt und sind ein wichtiger Indikator für die Art der von der Versuchsperson eingesetzten Problemdekomposition. Einträge auf der Hauptdiagonale, die nicht mit einem Baugruppenwechsel verbunden waren, wurden hingegen nicht gezählt, da es sich dabei um keine tatsächliche Vorgehensänderung handelt, sondern um ein aus der Vorabfestlegung des Beobachtungsintervalls resultierendes Artefakt.

Die so gewonnenen Daten über Richtung und Größe der Sprünge im Vorgehen mit und ohne Baugruppenwechsel waren Grundlage der weiteren Auswertung mit üblichen Methoden der quantitativen Datenanalyse (Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Quantitative Datenanalyse für das beobachtete Vorgehen bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Variable	Quelle	Erläuterung
Basisoperationen- und Phasenvisits	Vorgehensmatrix (Spaltensummen)	Häufigkeit, mit der Versuchspersonen vorab definierte Basisoperationen aus dem Vorgehensmodell durchführen bzw. in den mit diesen Basisoperationen verbundenen Phasen des Vorgehensmodells verweilen.
Vorgehenskettten	Vorgehensmatrix	Abfolge der Basisoperationen, die eine Versuchsperson bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags durchgeführt hat. Die mögliche Mehrfachbesetzung der Zeilen der Vorgehensmatrizen machte es hier z.T. notwendig, die tatsächliche Vorgehensreihenfolge aufgrund von Plausibilitäts- und Konsistenzüberlegungen (vgl. Kapitel 4.3, Akin 1979) zu rekonstruieren.
Baugruppenwechsel (BGW)	Übergangsmatrix	Anzahl der Baugruppenwechsel im gesamten Vorgehen, bezogen auf die Gesamtzahl der beobachteten Basisoperationen
Sprungweite	Übergangsmatrix (Zellenbesetzung)	Mittelwert der Beträge der Sprungweite aller bei einer Versuchsperson beobachteten Übergänge zwischen Basisoperationen.
Sprungweite mit BGW	Übergangsmatrix (Zellenbesetzung)	Mittelwert der Beträge der Sprungweite aller Übergänge, bei denen die Versuchsperson nach dem Übergang eine andere Hauptbaugruppe bearbeitet als vorher. Übergänge der Sprungweite 0 werden dabei gezählt.
Sprungweite ohne BGW	Übergangsmatrix (Zellenbesetzung)	Mittelwert der Beträge der Sprungweite aller Übergänge, bei denen die Versuchsperson nach dem Übergang die gleiche Hauptbaugruppe bearbeitet wie vorher. Übergänge der Sprungweite 0 werden dabei nicht gezählt.

Auf der Basis dieser Auswertung ist es möglich, die in 3.4.3 beschriebenen Vorgehens-typen aus dem analysierten Vorgehen zu identifizieren. Die Grundidee ist dabei, dass

die vier postulierten Vorgehenstypen sich vor allem durch zwei Hauptmerkmale unterscheiden, nämlich

- die Art der Problemdekomposition und
- die mittlere Sprungweite der beobachteten Übergänge im Vorgehen.

In Bezug auf die in der vorliegenden Studie zu bearbeitenden Konstruktionsaufträge und die quantitativen Daten der Vorgehensanalyse bedeutet das,

- dass hierarchisch-prozessorientierte Vorgehenstypen sich durch wenige und kleine Vor- und Rücksprünge und eine prozessorientierte Problemdekomposition auszeichnen. Diese weisen deshalb im beobachtbaren Vorgehen geringe mittlere Sprungweiten mit *und* ohne Baugruppenwechsel auf;
- dass hierarchisch-objektorientierte Vorgehenstypen das Konstruktionsproblem zunächst entlang der beiden Hauptbaugruppen zerlegen, diese dann jedoch in hierarchischen Episoden jeweils nacheinander bearbeiten. Diese Versuchspersonen weisen deshalb große mittlere Sprungweiten bei Übergängen mit Baugruppenwechseln auf, bei Übergängen ohne Baugruppenwechsel wird die Sprungweite dagegen klein ausfallen;
- dass opportunistisch-assoziative Vorgehenstypen vor allem eine schnelle Lösung von Teilproblemen im Auge haben und deshalb während der Bearbeitung einer Baugruppe auch größere Vor- und Rücksprünge in Kauf nehmen, wenn diese für eine solche Teillösung Erfolg versprechend erscheinen. Ein Baugruppenwechsel ist dagegen eher mit kleineren Sprungweiten verbunden, da im Erfolgsfalle versucht wird, eine auf ein Teilproblem angewandte Basisoperation anschließend auch mit einem anderen Teilproblem bzw. einer anderen Baugruppe zu assoziieren und auf diese anzuwenden;
- dass rein probierende Vorgehenstypen große Vor- und Rücksprünge im Vorgehen aufweisen, unabhängig davon, ob dieses mit einem Baugruppenwechsel verbunden ist oder nicht, da eine systematische Problemdekomposition und Vorgehenssteuerung fehlen.

Trägt man die mittleren Sprungweiten mit und ohne Baugruppenwechsel in einem Diagramm entlang der beiden Hauptachsen auf, so erhält man ein Portfolio der vier hypothetischen Vorgehenstypen (Abbildung 4-16).

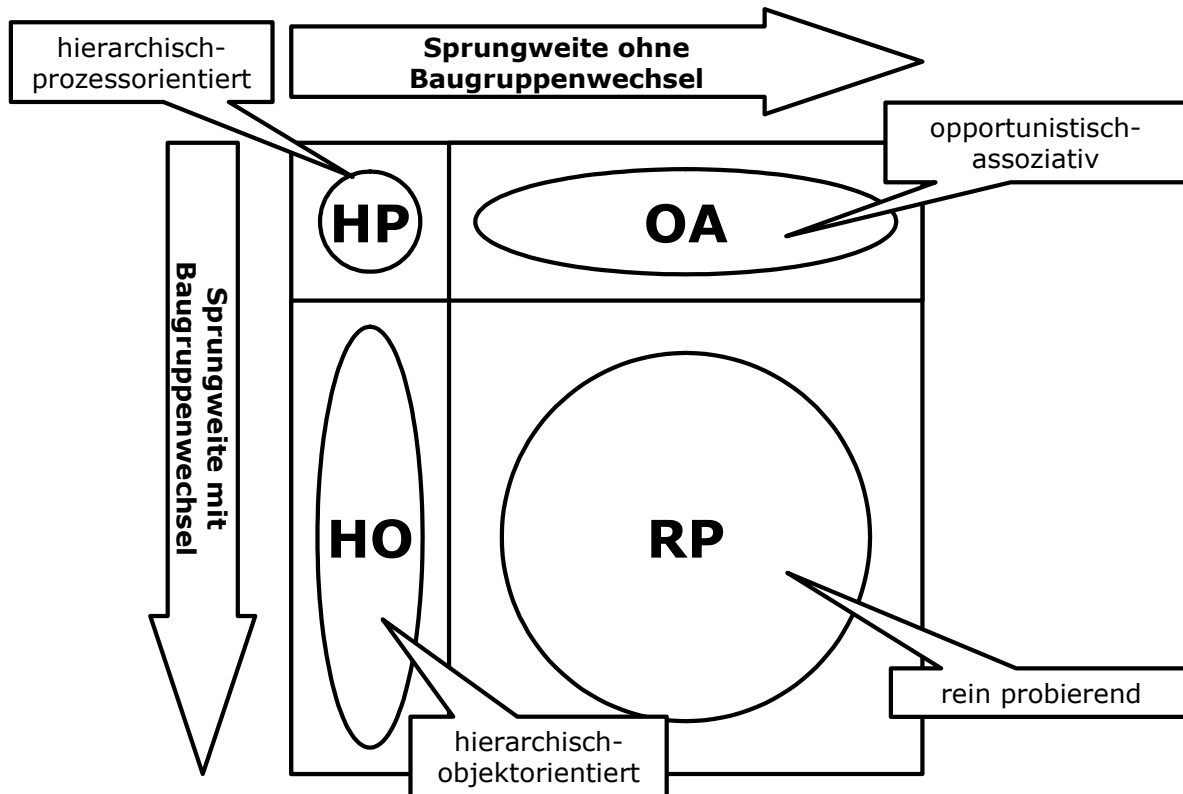


Abbildung 4-16: Portfolio hypothetischer Vorgehenstypen

Die hier dargestellten vier Sektoren geben nicht die vermutete Häufigkeit des Auftretens bestimmter Vorgehenstypen wieder sondern verdeutlichen, dass sich ein strikt hierarchisches Vorgehen durch sehr kleine Sprünge auszeichnet, während bei den anderen Vorgehenstypen deutliche größere Sprünge erwartet werden können. In der vorliegenden Studie wurde für die Auswertung und die Zuordnung von Vorgehenstypen ein datengeteuerter Zugang gewählt, um Vorgehenstypen gegeneinander abzugrenzen, da Hypothesen darüber, ab welcher mittleren Sprungweite der Übergang von einem Typus zu einem anderen vollzogen ist, nicht aufgestellt werden konnten.²⁹

4.4 Methodik für die Lösungsgütebeurteilung

Die in 1.1.2 formulierten Forschungsfragen zielen vor allem auf mögliche Zusammenhänge zwischen konstruktionsmethodischer Ausbildung, verschiedenen individuellen Vorgehensstilen und dem erzielten Konstruktionserfolg. Es ist deshalb notwendig, den Konstruktionserfolg valide zu messen. Der Konstruktionserfolg bemisst sich zunächst in der produkt- bzw. ergebnisorientierten Kategorie der Qualität des *direkten* Konstruktionsergebnisses, jedoch auch in prozeduralen Merkmalen wie der benötigten Bearbeitungszeit oder in prozessorientierten Kategorien der Qualität von Ergebnissen *indirekter* Konstruktionsarbeitsschritte wie z.B. der Qualität der Dokumentation von Auswahlentscheidungen.

²⁹ Es wurde eine Abgrenzung der Vorgehenstypen durch Dichotomisierung entlang der unteren Quartile der Sprungweiten vorgenommen und durch Sensitivitätsanalysen abgesichert (ausführlich in Kapitel 5.2.2.2).

Die Beurteilung des direkten Konstruktionserfolges stützt sich auf die von den Versuchspersonen erzeugten Dokumentationen des Konstruktionsergebnisses. Diese können Skizzen, Konstruktionszeichnungen, Berechnungsergebnisse, verbale Beschreibungen, Listen, Tabellen etc. enthalten. Um ihre Qualität zu messen, muss zunächst ein Qualitätsmaßstab entwickelt werden. Dieser kann bei einfachen Aufgabenstellungen aus der Formulierung einer Referenzlösung bestehen, mit der im Versuch erzeugte Lösungen direkt verglichen werden können. In der Regel führen Konstruktionsaufträge, die praxisnah formuliert sind, jedoch nicht auf eine einzige reproduzierbare Ideallösung, sondern auf einen Lösungsraum, in dem verschiedene gleichermaßen hochwertige Lösungen denkbar sind. Hier ist eine Qualitätsbeurteilung anhand einer Referenzlösung wenig praktikabel. Üblich und bewährt ist hier eine relative Beurteilung der Lösungsgüte von Konstruktionsergebnissen anhand eines eher abstrakt formulierbaren Standes der Technik. In der vorliegenden Studie wurde für die Beurteilung

- der Güte der ausgearbeiteten Lösungskonzepte,
- der Güte der selbst erstellten Konzeptbewertung und
- der Güte der Entwurfslösungen

ein formalisiertes Beurteilungsverfahren, das auf der Methode der Wertanalyse basiert, eingesetzt. Dabei wurde zur Sicherstellung der Auswertereliabilität die Beurteilung von einer Beurteilergruppe, bestehend aus drei Konstruktionsexperten, die über ausreichende Erfahrung in der Beurteilung solcher Arbeitsergebnisse verfügten, vorgenommen. Ein solches formalisiertes Beurteilungsverfahren sollte, um valide Ergebnisse zu liefern, die folgenden Beurteilungsschritte umfassen (vgl. PAHL & BEITZ 1997, S. 133ff.):

- Erkennen von Bewertungskriterien,
- Untersuchen der Bedeutung der Kriterien für den Gesamtwert,
- Zusammenstellen von Eigenschaftsgrößen,
- Beurteilen nach Wertvorstellungen,
- Bestimmen eines Gesamtwertes,
- Vergleichen der Lösungsvarianten.

Im Zentrum der Methode der Wertanalyse steht die Quantifizierung der Beurteilung durch Ermittlung von Teilwerten in einzelnen Beurteilungskategorien anhand definierter Beurteilungskriterien und der darauf aufbauenden Berechnung eines Gesamtwertes unter Berücksichtigung einer definierten relativen Gewichtung der Teilwerte. Dabei werden auch nicht direkt messbare Teilwerte durch Einführung nominaler Beurteilungsskalen oder Wertfunktionen einer quantitativen Verarbeitung zugänglich gemacht. Die Wertanalyse kann deshalb sowohl auf produkt- als auch auf prozessorientierte Beurteilungsbereiche angewandt werden.

4.4.1 Lösungsgüte in der Konzeptphase

Als Arbeitsergebnisse der Konzeptaufgabe sind Prinzipskizzen, Freihandskizzen, einfache virtuelle oder physische Modelle, verbale Beschreibungen, schriftlich dokumentierte Berechnungs- und Bewertungsergebnisse etc. denkbar. In der konkreten Laborsituation der vorliegenden Studie reduzierte sich die Menge der tatsächlich zu erwartenden Dokumente auf Skizzen, einfache Berechnungen und verbale Beschreibungen.

Lösungskonzepte sind zunächst nur wenig konkretisierte Darstellungen möglicher Lösungen für eine gegebene Problemstellung. Entsprechend fußt ihre Beurteilung auf einer weniger sicheren Informationsbasis und hat so eher den Charakter einer grundsätzlichen Einschätzung der Potenziale und Grenzen der Lösungskonzepte vor dem Hintergrund der Expertenerfahrung der Beurteiler. PAHL & BEITZ 1997 (S. 131) schlagen für diesen ersten Beurteilungs- und Auswahlschritt die Verwendung einer Auswahlliste vor, die anhand von sieben Beurteilungskriterien und einer zweiwertigen Skala eine Auswahlentscheidung zwischen verschiedenen Lösungsvarianten ermöglicht. Einige dieser Kriterien können nach leichter Anpassung auch für die Beurteilung von Konzeptlösungen in der Konstruktionsforschung herangezogen werden. Hinzu kommen Kriterien, die in der Konstruktionspraxis von untergeordneter Bedeutung sind, für einige insbesondere psychologische Fragestellungen in Laborstudien jedoch von hohem Interesse sein können. Hierzu zählt z.B. die Frage, wie viele unabhängige Lösungskonzepte eine Versuchsperson erarbeitet hat, weil sich daraus Rückschlüsse z.B. auf individuelle Vorgehensweisen ziehen lassen. Aus diesen Überlegungen heraus wurden Kriterien und Leitfragen für die Beurteilung der Arbeitsergebnisse aus der Konzeptphase definiert, die Grundlage für die systematische Lösungsgütebeurteilung waren (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Beurteilungskriterien und Leitfragen für die Beurteilung produktorientierter Konstruktionsergebnisse der Konzeptphase

Lösungsgüte Konzept	
Kriterium	Leitfrage
Anzahl	Wie viele Lösungskonzepte wurden ausgearbeitet?
Unabhängigkeit	Wie viele unabhängige Wirkprinzipien wurden gefunden?
Transparenz	Sind alle wesentlichen Merkmale erkennbar und beurteilbar?
Funktion	Sind die Lösungskonzepte zur Funktionserfüllung geeignet?
Einfachheit	Sind die Lösungskonzepte mit vertretbarem Aufwand realisierbar?

Die relative Bedeutung dieser Kriterien wurde mit Hilfe des Verfahrens der binären Bewertung (vgl. PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 156), bei dem jedes Kriterium paarweise mit jedem anderen von drei Konstruktionsexperten unabhängig voneinander hinsichtlich seiner Bedeutung verglichen wurde, festgelegt.

Für die weitere Operationalisierung wurde ein Beurteilungsschema entwickelt, bei dem jeweils für jede Lösungsvariante eine zweiwertige Beurteilung der Erfüllung der in Tabelle 4-4 aufgeführten Kriterien (erfüllt/ nicht erfüllt) durchgeführt und eine anschlie-

ßende Zusammenfassung dieser Beurteilung durch Zählung der Anzahl von Varianten, die das jeweilige Kriterium erfüllten, vorgenommen wurde (Abbildung 4-17).

DFG BE 479_68-1 A1 Untersuchung Längsschnitt Beurteilung der Lösungsgüte / Konzept					VP-Nr.: _____
Kriterium	Skala	Gewicht	Wert	gew. Wert	
		g	W	g*W	
Anzahl Anzahl der ausgearbeiteten Lösungskonzepte	0 = keine Konzeptvariante 1 = eine Konzeptvariante 2 = zwei Konzeptvarianten 3 = drei Konzeptvarianten 4 = vier Konzeptvarianten 5 = fünf Konzeptvarianten 6 = mehr als fünf Konzeptvarianten	1			
Unabhängigkeit Anzahl der gefundenen Wirkprinzipien	0 = kein Wirkprinzip 1 = ein Wirkprinzip 2 = zwei unterschiedliche Wirkprinzipien 3 = drei unterschiedliche Wirkprinzipien 4 = vier unterschiedliche Wirkprinzipien 5 = fünf unterschiedliche Wirkprinzipien 6 = mehr als fünf unterschiedliche Wirkprinzipien	3			
Transparenz alle wesentlichen Merkmale erkennbar und beurteilbar?	0 = bei keiner Konzeptvariante 1 = bei einer Konzeptvariante 2 = bei zwei Konzeptvarianten 3 = bei drei Konzeptvarianten 4 = bei vier Konzeptvarianten 5 = bei fünf Konzeptvarianten 6 = bei mehr als fünf Konzeptvarianten	2			
Funktion Lösungskonzepte geeignet zur Funktionserfüllung?	0 = keine Konzeptvariante 1 = eine Konzeptvariante 2 = zwei Konzeptvarianten 3 = drei Konzeptvarianten 4 = vier Konzeptvarianten 5 = fünf Konzeptvarianten 6 = mehr als fünf Konzeptvarianten	3			
Einfachheit Lösungskonzepte mit vertretbarem Aufwand realisierbar?	0 = keine Konzeptvariante 1 = eine Konzeptvariante 2 = zwei Konzeptvarianten 3 = drei Konzeptvarianten 4 = vier Konzeptvarianten 5 = fünf Konzeptvarianten 6 = mehr als fünf Konzeptvarianten	1			
				Summe g*W	
				Lösungs- güte [%]	

Abbildung 4-17: Beurteilungsschema für die Beurteilung der produktorientierten Lösungsgüte in der Konzeptphase

Als Teilwert für jedes Kriterium wurde so die Anzahl von erarbeiteten Konzepten, bei denen seine Erfüllung für ein Team von Fachbeurteilern erkennbar war, dokumentiert.

Unter Berücksichtigung der Gewichtung der Beurteilungskriterien führte dies für jede Versuchsperson auf einen Gesamtwert der Lösungsgüte bei der Bearbeitung des Konstruktionsauftrags aus der Konzeptphase.

4.4.1.1 Prozedurale Lösungsgüte in der Konzeptphase

Gerade in frühen Produktentwicklungsphasen kommt prozessorientierten Kategorien des Konstruktionserfolgs eine hohe Bedeutung zu. In dieser Phase werden die meisten Produktmerkmale schon definiert, was aufgrund des noch hohen Abstraktionsgrades und der unsicheren Informationsbasis ein hohes Entwicklungsrisiko nach sich zieht. Zur Minimierung dieses Entwicklungsrisikos ist eine nachvollziehbare und reproduzierbare Vorgehensweise unabdingbar, die möglichst viele der der Produktdefinition in diesem Stadium zugrunde liegenden Annahmen und Entscheidungen offen legt und für nachfolgende Arbeitsphasen verfügbar hält. Auch die Möglichkeit der Nutzung von Wissen und Erfahrungen aus vergangenen Entwicklungsprojekten („Design Reuse“) ist direkt abhängig von der Qualität dieser prozessorientierten Arbeitsergebnisse. So fanden z.B. KUFFNER & ULLMAN 1991 in einer empirischen Studie heraus, dass eine Vielzahl von Informationen, die für die Überarbeitung einer Konstruktion (im Sinne einer Anpassungskonstruktion) benötigt wurden, in einer klassischen Produktdokumentation nicht enthalten waren. In dieser Studie wurden drei Konstrukteure mit einer vollständigen Produktdokumentation eines abgeschlossenen Projektes aus dem Bereich der mechanischen Konstruktion konfrontiert, bestehend aus dem vollständigen Zeichnungssatz und der originalen Anforderungsliste. Ihre Aufgabe bestand darin, diese Entwürfe zu überarbeiten. Als weitere Informationsquelle stand ihnen außerdem ein Experte, der mit den ursprünglichen Entwürfen vertraut war, für Fragen zur Verfügung. Den Versuchspersonen war trotz der vorliegenden umfangreichen Produktdokumentation in einer Vielzahl der Fälle unklar (KUFFNER & ULLMAN 1991, S. 46),

- wie einzelne Baugruppen oder Komponenten genau gestaltet waren („Construction“);
- wie einzelne Baugruppen oder Komponenten zueinander positioniert waren („Location“);
- auf der Basis welchen Wirkprinzips einzelne Baugruppen oder Komponenten ihre jeweilige Funktion erfüllten („Operation“);
- zu welchem Zweck bzw. zur Erfüllung welcher Funktion einzelne Baugruppen oder Komponenten überhaupt vorgesehen waren („Purpose“).

Insbesondere die letzten beiden Punkte, die zusammen ca. ein Drittel aller offenen Fragen ausmachten, führten auf Fragen bzw. Annahmen darüber, warum frühere Konstrukteure jeweils einzelne Entwicklungsentscheidungen getroffen hatten. Diese Fragen konnten auf der Basis der Produktdokumentation überwiegend gar nicht beantwortet werden, sondern wurden entweder von dem zur Verfügung stehenden Experten beantwortet oder blieben sogar vollständig unbeantwortet (Abbildung 4-18).

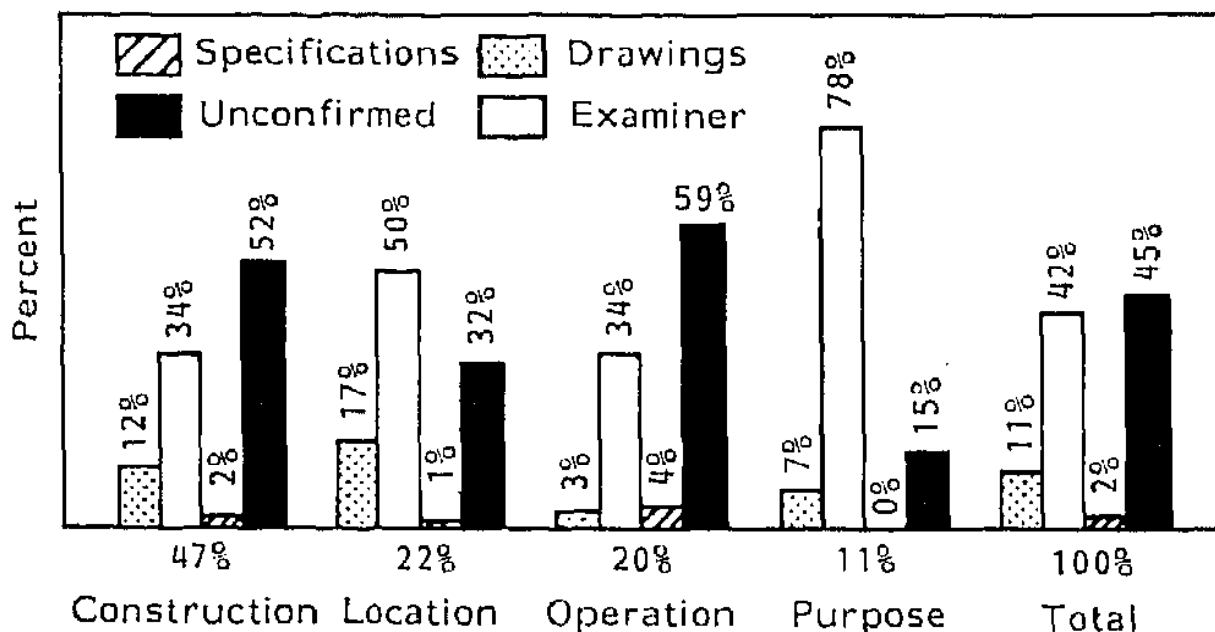


Abbildung 4-18: offene Fragen und benutzte Informationsquellen bei einer Anpassungskonstruktion (KUFFNER & ULLMAN 1991, S. 48)

Insbesondere die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungsprozessen ist demnach ein wichtiges prozedurales Lösungsgütekriterium, das durch geeignete Dokumentation des Entscheidungsprozesses und insbesondere der einer Entscheidung zugrunde liegenden Beurteilungskriterien erfüllt werden kann.

Aber auch auf der individuellen Handlungsebene lässt die Untersuchung selbst vollkommen unausgebildeter Konstruktionsanfänger den Schluss zu, dass die Fähigkeit zur kritischen Beurteilung eigener Arbeitsergebnisse ein zentrales Merkmal erfolgreicher Vorgehensweisen ist, da diese einen Auslöser für Überarbeitungs- und Korrekturprozesse darstellen und so in der Regel zu einer Verbesserung der Lösung führen (vgl. WETZSTEIN & HACKER 2002).

Aus diesem Grund wurde als prozedurales Lösungsgütekriterium für die Konzeptphase die Qualität der von den Versuchspersonen selbst durchgeführten Beurteilung der von ihnen erarbeiteten Lösungsvarianten und der abschließenden Auswahlentscheidung untersucht. Zu beurteilen waren hier entweder rein verbale Einschätzungen der selbst erzeugten Konzeptvarianten oder systematischer dokumentierte Ergebnisse einer mit numerischen Methoden (binäre Bewertung, Wertanalyse etc.) durchgeführten Konzeptbeurteilung.

Wichtigstes Kriterium der Lösungsgüte in dieser Kategorie ist natürlich die inhärente Qualität des Beurteilungsergebnisses selbst, die sich in der Korrektheit der abschließenden Auswahlentscheidung widerspiegelt. Die Qualität der Dokumentation des Beurteilungsergebnisses und des Beurteilungsprozesses drückt sich zum einen in deren Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit aus, im Weiteren aber auch dadurch, dass essentielle Beurteilungsschritte tatsächlich vollzogen und dokumentiert werden (vgl. PAHL & BEITZ 1997, S. 219ff.). Schließlich gibt es fundamentale technische und wirt-

schaftliche Kriterien, die bei jeder Konzeptbewertung beachtet werden müssen (vgl. z.B. PAHL & BEITZ 1997, S. 134 ff.). Aufbauend auf diesen Überlegungen wurden auch für diese Lösungsgütekategorie Beurteilungskriterien und Leitfragen entwickelt (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Beurteilungskriterien und Leitfragen für die Beurteilung der prozeduralen Lösungsgüte in der Konzeptphase (Qualität der Konzeptbeurteilung)

Lösungsgüte der Bewertung der Konzepte	
Kriterium	Leitfrage
Bewertungsergebnis	Sind das Ergebnis der Bewertung und die Schlussfolgerungen zutreffend?
Transparenz der Bewertung	Ist die Bewertung nachvollziehbar und reproduzierbar dokumentiert?
systematische Teilschritte	Wurde in systematischen Teilschritten bewertet?
techn.-wirtschaftl. Kriterien	Wurden einschlägige technisch-wirtschaftliche Bewertungskriterien berücksichtigt?

Für die Operationalisierung wird auch hier ein Beurteilungsschema eingesetzt, das eine einfache Handhabung durch ein beurteilendes Expertenteam zulässt. Dieses Beurteilungsschema gliedert sich in einen globalen ersten und einen mit den in Tabelle 4-5 dokumentierten Beurteilungskriterien unteretzten zweiten Teil (Abbildung 4-19).

DFG BE 479_68-1

A1 Untersuchung Längsschnitt

Beurteilung der Selbsteinschätzung der Konzeptvarianten

VP-Nr.: _____

Bewertung	ja	nein
Wurde eine Bewertung vorgenommen?		
Numerische Bewertung?	ja	nein
Wurde die Bewertung numerisch ausgeführt (Zahlen)?		
Verbale Beschreibung?	ja	nein
Wurde die Bewertung verbal ausgeführt (Beschreibung)?		

Kriterium	Gewicht	Wert	gew. Wert										
	g	W	g*W										
<p>Bewertungsergebnis</p> <p>Sind das Ergebnis der Bewertung und die Schlußfolgerungen zutreffend?</p>	2												
<p>Transparenz der Bewertung</p> <p>Ist die Bewertung nachvollziehbar und reproduzierbar dokumentiert?</p>	2												
<p>systematische Teilschritte?</p> <p>Wurde in systematischen Teilschritten bewertet?</p>	1	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="background-color: #cccccc;"></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> </table>											
<p>techn.-wirtschaftl. Kriterien?</p> <p>Wurden einschlägige techn.-wirtschaftl. Bewertungskriterien berücksichtigt?</p>	1	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="background-color: #cccccc;"></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> <tr><td></td></tr> </table>											
		Summe g*W											
		Lösungs- güte [%]											

Abbildung 4-19: Beurteilungsschema für die Beurteilung der prozeduralen Lösungsgüte in der Konzeptphase (Qualität der Konzeptbeurteilung)

Im ersten Teil des Beurteilungsschemas wird erfasst, ob überhaupt eine Bewertung der verschiedenen Konzepte durch die Versuchspersonen erkennbar ist und ob diese numerisch und/ oder verbal-beschreibend durchgeführt wurde. Im zweiten Teil werden das Beurteilungsergebnis und die Transparenz der Beurteilung mit einer 5-wertigen Ordinalskala beurteilt. Die Beurteilung der systematischen Vorgehensweise und der Berück-

sichtigung elementarer technisch-wirtschaftlicher Kriterien geschieht anhand einer weiteren Untergliederung in Unterkriterien. Diese werden jeweils einzeln mit Hilfe einer dreiwertigen Ordinalskala beurteilt. Mit Hilfe dieses Beurteilungsschemas konnte auch für diese Lösungsgütekategorie ein Gesamtwert der Lösungsgüte ermittelt werden.

4.4.2 Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase

Als Arbeitsergebnis für die Vorentwurfsphase liegt vor allem eine maßstabsgerechte Entwurfszeichnung vor, die Grundlage der Beurteilung der Lösungsgüte ist. In der universitären Konstruktionslehre ist die Beurteilung der Lösungsgüte von Entwürfen eine tägliche Routineaufgabe. Überwiegend erfolgt diese Lösungsgütebeurteilung intuitiv und erfahrungsbasiert, ggf. unter Zuhilfenahme von Beurteilungskriterien, die allgemein anerkannten Regeln der Konstruktionspraxis folgen (vgl. Abbildung 4-20). Die Validität und Retestreliaibilität der Beurteilungsergebnisse ist bei diesem Verfahren jedoch vergleichsweise niedrig.

Korrekturmerkmale für Entwürfe in der Konstruktionslehre	
F	Funktion nicht erfüllt / nicht gewährleistet
	<u>Energiefluß</u>
Bre	"Bremse" / Bauteilkollision
Lag	Lager / Lagerung nicht geeignet / Lagerungsprinzip falsch
Mdü	Md-Übertragung fraglich / fehlt
WNV	Welle-Nabe-Verbindung fehlt / nicht geeignet
	<u>Lage festlegen</u>
AxF	Axiale Festlegung fehlt / nicht geeignet
Ein	Einstellmöglichkeit fehlt / nicht geeignet
Pas	Passungen fehlen / nicht geeignet
Pos	Positionierung fehlt / nicht geeignet
Vdr	Verdrehsicherung fehlt / nicht geeignet
Ver	Verbindungselement fehlt / nicht geeignet
Zen	Zentrierung fehlt / ungünstig
	<u>Schmierer und Dichten</u>
Dic	Dichtelement fehlt / nicht geeignet
Smi	Schmierung fehlt / nicht geeignet / nicht sichergestellt
	<u>Aufgabenstellung</u>
F?	Funktion unklar / nicht notwendig / nicht lt. Aufgabenstellung
B	Gestaltung nicht beanspruchungsgerecht
Anz	Anzahl der Bauteile verändern: Bauteilfunktionen trennen / zusammenlegen
Bgr	Baugröße verändern
Ker	Kerbwirkung verringern / Spannungsverlauf ungünstig
Fe	Gestaltung nicht fertigungsgerecht, Fertigung nicht möglich
Dop	Doppelpassungen
Fe?	Fertigung schwierig / aufwendig
Guß	Gußgestaltung: Druckbeanspruchung anstreben, gleichmäßige Wanddicken anstreben, Rippen vorsehen, waagerechte Wandteile vermeiden, Aushebeschrägen vorsehen, Gußradien vorsehen, Hinterschneidungen vermeiden, Spannflächen vorsehen, Bearbeitungsflächen vorsehen
Sch	Schweißgestaltung: Halbzeuge verwenden, Positionieren der Teile vereinfachen, Nahtanhäufung vermeiden, Zugang erleichtern
Wel	Wellengestaltung: Funktionsflächen absetzen, Baugröße verringern
Wer	Werkzeugauslauf berücksichtigen
M	Gestaltung nicht montagegerecht, Montage nicht möglich
Fas	Montagefase vorsehen
M?	Montage schwierig / aufwendig
War	Wartung, Inspektion, Instandsetzung schwierig / aufwendig
	Darstellungstechnik
Dar	Darstellung falsch / unklar / nicht normgerecht / unvollständig

Abbildung 4-20: Beurteilungskriterien für die qualitativ intuitive Beurteilung von Entwurfszeichnungen

LANGNER 1991 und RÜCKERT 1997 haben deshalb aufbauend auf diesen Erfahrungen ein verbessertes Beurteilungsschema entwickelt, das die Beurteilung von Entwürfen mit Hil-

fe der Methode der Wertanalyse einer sehr guten Nachvollziehbarkeit und Quantifizierbarkeit zuführt (vgl. RÜCKERT 1997, S. 34 und S. 169 ff.). Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde dieses Verfahren nur leicht modifiziert. Es wurden die in Tabelle 4-6 dokumentierten Kriterien und Leitfragen für die Beurteilung von Entwurfszeichnungen definiert.

Tabelle 4-6: *Beurteilungskriterien und Leitfragen für die Beurteilung der produktorientierten Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase*

Lösungsgüte Entwurf / Konstruktionszeichnung	
Kriterium	Leitfrage
Funktion	Wird die Gesamtfunktion erfüllt?
Gestaltung	Ist die Gestaltung beanspruchungsgerecht und werden einschlägige Gestaltungsregeln befolgt?
Fertigung	Ist die Fertigung möglich?
Montage	Ist die Montage möglich?
Zuverlässigkeit	Ist das Gebrauchsverhalten ausfallsicher?
Einfachheit	Ist die gesamte Baugruppe einfach gestaltet?
Eindeutigkeit	Sind die Systemzustände eindeutig erkennbar?
Vollständigkeit	Ist der Entwurf vollständig?

In der Literatur findet man z.T. Vorschläge für eine Definition von Beurteilungskriterien, die sich sehr viel enger an den konkreten Konstruktionsauftrag anlehnen und z.B. die Erfüllung konkreter, im Auftrag genannter Anforderungen überprüfen (vgl. z.B. DYLLA 1991, S. 61f. oder GÜNTHER 1998, S. 48). Auch RÜCKERT 1997 (S. 169f.) berücksichtigt zwei aufgabenspezifische – jedoch nur sehr schwach gewichtete – Kriterien, die die Einhaltung zentraler Forderungen messen. Dieses führt im Einzelfall zu einer feineren Beurteilung der einzelnen Entwurfslösung, geht jedoch zu Lasten der Vergleichbarkeit von Beurteilungsergebnissen verschiedener Studien und Konstruktionsaufträge.

GÜNTHER 1998 und auch LANGNER 1991 schlagen zudem vor, die zeichnerische Darstellung des Entwurfs im Sinne einer normgerechten technischen Zeichnung mit in die Beurteilung einzubeziehen. Dieses kann je nach Untersuchungsziel durchaus sinnvoll sein und ist in der universitären Konstruktionslehre ein historisch gewachsenes wichtiges Kriterium. In der Konstruktionspraxis ist dieses Kriterium jedoch angesichts des flächendeckenden CAD-Einsatzes von abnehmender Bedeutung, während die Bedeutung von Freihandskizzen in frühen Phasen der Produktentwicklung zunimmt (vgl. z.B. RÖMER ET AL. 2001).

In der vorliegenden Studie wurden deshalb die der Beurteilung der Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase zugrunde liegenden Kriterien auf den in Tabelle 4-6 dokumentierten Satz beschränkt. Auch hier wurde ein leicht handhabbares Beurteilungsschema entwickelt, das von einer dreiköpfigen Beurteilergruppe eingesetzt wurde (Abbildung 4-21). Der unterschiedlichen relativen Bedeutung der einzelnen Kriterien in Bezug auf die Ge-

samtlösungsgüte wurde – wie bei der Beurteilung der Lösungsgüte in der Konzeptphase – durch Gewichtungsfaktoren Rechnung getragen, die wiederum von Konstruktionsexperten mit der Methode der binären Bewertung validiert wurden.

DFG BE 479_68-1 A1 Untersuchung Längsschnitt Beurteilung der Lösungsgüte / Entwurf					VP-Nr.: _____
Kriterium	Skala	Gewicht	Wert	gew. Wert	
		g	W	g*W	
Funktion Wird die Gesamtfunktion erfüllt?	0 = nein, Funktionserfüllung ausgeschlossen 1 = nur durch Hinzufügen/Entfernen wesentl. Bauteile/Baugruppen 2 = aufwendige Gestaltungsänderung nötig 3 = bei geringfügiger Anpassung 4 = ja, ohne Einschränkung	3			
Gestaltung Ist die Gestaltung beanspruchungsgerecht?	0 = falsche Auslegung 1 = Bruchgefahr / widerspricht gängigen Gestaltungsregeln 2 = ungünstige Gestaltung / Materialaufwand zu hoch 3 = Auslegung i.O., Kraftfluß jedoch nicht optimal 4 = ja, ohne Einschränkung	3			
Fertigung Ist die Fertigung möglich?	0 = mehrere Bauteile nicht fertigbar 1 = ein funtionswichtiges Bauteil nicht fertigbar 2 = schwierige Fertigung 3 = bei geringfügiger Anpassung 4 = ja, ohne Einschränkung	2			
Montage Ist die Montage möglich?	0 = nein, Montage in mehreren Gestaltungszonen unmöglich 1 = Montage in einer Gestaltungszone unmöglich 2 = schwierige Montage 3 = bei geringfügiger Anpassung 4 = ja, ohne Einschränkung	2			
Zuverlässigkeit Ist das Gebrauchsverhalten ausfallsicher?	0 = sehr hohe Ausfallgefahr, kurze Lebensdauer 1 = hohe Ausfallgefahr 2 = Ausfall möglich / wahrscheinlich 3 = bei geringfügiger Anpassung 4 = ja, ohne Einschränkung	2			
Einfachheit Ist die gesamte Baugruppe einfach gestaltet?	0 = viele und kompliziert gestaltete Bauteile 1 = viele oder kompliziert gestaltete Bauteile 2 = befriedigende Lösung 3 = wenige bzw. einfach gestaltete Bauteile 4 = ja, ohne Einschränkung	1			
Eindeutigkeit Sind die Systemzustände erkennbar und eindeutig?	0 = nein, Systemzustände mehrdeutig 1 = nur durch Hinzufügen/Entfernen von Bauteilen/Baugruppen 2 = aufwendige Gestaltungsänderung nötig 3 = bei geringfügiger Anpassung 4 = ja, ohne Einschränkung	1			
Vollständigkeit Ist der Entwurf vollständig?	0 = alle wesentl. Funktionen / Gestaltungszonen unvollständig 1 = wesentl. Funktionen / Gestaltungszonen fehlen / unvollständig 2 = ein/e wesentliche/s Bauteil / Gestaltungzone fehlt 3 = unwesentliche Bauteile / Gestaltungszonen fehlen 4 = ja, ohne Einschränkung	1			
			Summe		
			g*W		
			Lösungs-		
			güte [%]		

Abbildung 4-21: Beurteilungsschema für die Beurteilung der produktorientierten Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase

Mit Hilfe dieses Beurteilungsschemas konnte für jede vorliegende Lösung ein valider Gesamtwert der Lösungsgüte ermittelt werden.

4.5 Datenauswertung und statistische Testmethoden

Für die Auswertung der erhobenen Daten wurden geeignete statistische Verfahren eingesetzt. Dabei traten aufgrund des verlaufsorientierten Gruppendesigns einige methodische Probleme auf:

- Die auswertbare Fallzahl war z.T. (insbesondere auf dem Ausbildungsniveau A3) klein.
- Beim statistischen Vergleich zweier oder mehrerer Gruppen waren die Fallzahlen z.T. stark unterschiedlich.
- Die Verteilung der Häufigkeitsdaten war in der Mehrzahl der Fälle nicht normalverteilt und folgte auch sonst keiner einschlägigen statistischen Verteilung.

Es wurden deshalb grundsätzlich nichtparametrische statistische Methoden und Tests eingesetzt, die auch bei den vorliegenden Häufigkeitsverteilungen und bei kleinen Fallzahlen valide Ergebnisse liefern. Es konnte dabei auf Erfahrungen und Methoden aus der medizinischen Forschung zurückgegriffen werden, die sich oft ähnlichen methodischen Problemen gegenübersehen (vgl. hier vor allem BORTZ & LIENERT 1998, die sich dieser Problematik ausführlich widmen).

In der vorliegenden Studie mit einem verlaufsorientierten Gruppendesign stehen Unterschiede in Merkmalsausprägungen zwischen den verschiedenen Versuchs- und Kontrollgruppen im Mittelpunkt des Interesses. Bei nominalen Daten werden Gruppenunterschiede durch Kontingenztafelanalysen und Anwendung des exakten Fisher-Tests untersucht, da diese auch bei kleinen Stichproben und kleinen erwarteten Häufigkeiten anwendbar sind (vgl. BORTZ & LIENERT 1998, S. 71 ff.).

Bei ordinalen und metrischen Daten wird bei ausreichend großen ($N \geq 8$) und ungefähr gleich großen Stichproben der U-Test von Mann-Whitney eingesetzt, der auf Ranginformationen basiert und diese vollständig ausnutzt. Da der U-Test bei kleinen Stichproben und bei großen Stichprobenunterschieden an Validität verliert (vgl. BORTZ & LIENERT 1998), kommen in diesen Fällen der Mediantest und der H-Test von Kruskal & Wallis zum Einsatz. Beide Tests liefern auch unter diesen Bedingungen noch valide Ergebnisse. Insbesondere der Mediantest nivelliert Auswertefehler bei Daten, die auf subjektiven Schätzurteilen basieren, da er durch Dichotomisierung der Daten an der 50%-Grenze detailliertere Ranginformationen vernachlässigt: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schätzurteil die Ränge zweier dicht beieinander liegenden Werte vertauscht, ist weit höher als die Wahrscheinlichkeit, dass Werte – z.B. bezogen auf den Median – auf der „falschen“ Seite platziert werden. (vgl. BORTZ & LIENERT 1998 S. 122 ff. und S. 142 ff.)³⁰.

³⁰ Das Softwarepaket SPSS 11.0, das für die statistische Datenanalyse eingesetzt wurde, sortiert bei der Anwendung des Mediantests Werte, die genau auf dem Median liegen, automatisch in die Gruppe der unter dem Median liegen-

Bei der Untersuchung monotoner Zusammenhänge zwischen zwei Variablen wird der nichtparametrische Rangkorrelationskoeffizient Kendall τ bestimmt, der geringere Anforderungen an das Datenmaterial als Spearman ρ stellt, da letzterer nur dann valide Ergebnisse liefert, wenn die Merkmalsabstände äquidistant sind. Dieses muss bei ordinalen Daten zusätzlich inhaltlich gerechtfertigt werden. Kendall τ verarbeitet hingegen rein ordinale Informationen.

Um z.B. Unterschiede in der Bandbreite von Häufigkeitsverteilungen zwischen zwei oder mehr Gruppen zu untersuchen, wird auf ordinalem und metrischem Datenniveau (als einziges verteilungsbasiertes Verfahren) zusätzlich der Levené-Test auf Homogenität der Varianzen benutzt.

Tabelle 4-7 gibt einen Überblick über die eingesetzten Testverfahren.

Tabelle 4-7: Übersicht über eingesetzte statistische Testverfahren

Art der Daten	Auswerteziel	Fall	Methode
nominal	Vergleich zweier unabhängiger Stichproben mit 2-fach gestuften Merkmalen	alle	exakter Fisher-Test
	Vergleich zweier unabhängiger Stichproben bei k-fach gestuften Merkmalen	alle	exakter Fisher-Test
ordinal/ metrisch	Vergleich zweier unabhängiger Stichproben	Fallzahl beider Stichproben ≥ 8	U-Test nach Mann-Whitney
		Fallzahl einer Stichprobe < 8 oder größere Stichprobe mehr als doppelt so groß wie kleinere Stichprobe	Mediantest und H-Test nach Kruskal & Wallis
	Vergleich mehrerer unabhängiger Stichproben	alle	Mediantest/ H-Test nach Kruskal & Wallis
	monotone Korrelation zweier ordinaler oder metrischer Variablen	alle	Kendall τ
	Vergleich zweier oder mehrerer Stichproben auf Homogenität der Varianzen	alle	medianbasierter Levené-Test

Von einem formal-methodischen Blickwinkel aus kann gefordert werden, dass bei der Untersuchung von Unterschieden in Merkmalsausprägungen zwischen mehr als zwei Untersuchungsgruppen zunächst Haupteffekte durch globalen Vergleich über alle Gruppen untersucht werden und nur bei so nachgewiesenen signifikanten Haupteffekten eine detaillierte Untersuchung von paarweisen Kontrasten zwischen den Untersuchungsgruppen gerechtfertigt werden kann. In der vorliegenden Studie sprechen dagegen je-

den Werte, was zu einer systematischen Verfälschung der Ergebnisse führt. Die korrekte Vorgehensweise ist hier, solche Werte bei der Auswertung nicht zu berücksichtigen (vgl. BORTZ & LIENERT 1998, S. 123). Dieses Vorgehen wurde in der vorliegenden Arbeit gewählt.

doch starke inhaltliche Argumente: Bei der verlaufsorientierten Untersuchung von Ausbildungsfortschritten gibt es z.T. entgegengesetzt gerichtete Hypothesen, die zwischen einzelnen Untersuchungsgruppen unterschiedliche Merkmalsausprägungen erwarten lassen, zwischen anderen dagegen keine. So wird z.B. typischerweise erwartet, dass eine „frische“, rein theoretisch vermittelte konstruktionsmethodische Ausbildung keine handlungswirksamen Effekte zeigt, eine in praktischer Übung vertiefte Ausbildung dagegen sehr wohl. Bei einem globalen, über alle Gruppen durchgeführten Test auf Gruppenunterschiede müssen bei einem der Hypothese entsprechenden Untersuchungsergebnis Haupteffekte über alle Gruppen deshalb fast zwangsläufig verschwinden. Nur wenn der Ausbildungseffekt in der vertieft ausgebildeten Untersuchungsgruppe gegenüber einem nicht festgestellten Ausbildungseffekt in der nur theoretisch ausgebildeten Gruppe stark dominierte, könnte hier ein Haupteffekt über alle drei Gruppen nachgewiesen werden. Die Hypothese wäre jedoch auch dann bestätigt, wenn die Einzeleffekt signifikant nachgewiesen werden können. Die Auswertung beschränkt sich in dieser Arbeit deshalb überwiegend auf die Untersuchung dieser Einzeleffekte.

4.5.1 Gefordertes Signifikanzniveau und Effektstärken

Angeichts der besonderen Problematik empirischer Konstruktionsforschung (vgl. BENDER ET AL. 2002A) ist es in der Regel schwierig, Einflussfaktoren und Effekte sicher zu isolieren. In der vorliegenden Studie wurden zwar höchstmögliche Anstrengungen unternommen, um im Untersuchungsdesign die maßgeblichen Gütekriterien empirischer Forschung zu erfüllen, trotzdem bleiben aufgrund der zentralen Rolle qualitativer Schätzurteile bei der Datenerhebung und -auswertung eine Reihe von Unsicherheiten bestehen. Durch die Gewinnung solcher Schätzurteile in Beurteilergruppen ist ein *systematischer* Störeinfluss jedoch mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen. Eher ist zu erwarten, dass sich Beurteilungsunsicherheiten im statistischen Mittel ausgleichen. Auch eine systematische Beeinflussung der Beurteilung in Richtung auf die Hypothesen kann ausgeschlossen werden, da die Beurteiler zum einen die Hypothesen im einzelnen gar nicht kannten, zum anderen die Zuordnung der zu beurteilenden Merkmale zu Versuchspersonen und Untersuchungsgruppen durch Anonymisierung unmöglich war. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass im Rahmen dieses sehr vorsichtigen Untersuchungsdesigns nachgewiesene Effekte mit hoher Sicherheit auch valide sind. Es wird deshalb bei allen Signifikanztests ein Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ als ausreichend für den Nachweis eines Effektes angesehen. Bis $\alpha=0,10$ werden Merkmalsunterschiede im Sinne einer Tendenzaussage verwendet. In Fällen, in denen zwei verschiedenen Signifikanztests zum Einsatz kommen, wird es zudem als angemessen betrachtet, die Hypothese anzunehmen, wenn einer von beiden Tests eine signifikante Aussage erlaubt. Im Gegenzug werden dafür durchgängig zweiseitige Signifikanztests durchgeführt, um die Aussagesicherheit weiter zu erhöhen, auch wenn in einzelnen Fällen gerichtete Hypothesen eine einseitige Testung zuließen.

Da neben der Signifikanz von Merkmalsunterschieden in der Konstruktionsforschung die empirische Relevanz von Unterschieden oder Zusammenhängen von besonderem Inte-

resse ist (vgl. Kapitel 1.1), werden – bei vorliegender Signifikanz – auch die Effektstärken der Unterschiede bzw. Zusammenhänge untersucht. Bei nominalen Daten bemisst sich die Effektstärke des Zusammenhangs zweier Datenverteilungen z.B. am Kontingenzkoeffizienten (BORTZ & LIENERT 1998, S. 232f.). Dabei werden Effektstärken $w \geq 0,10$ als klein, $w \geq 0,30$ als mittel und $w \geq 0,50$ als groß betrachtet (BORTZ & DÖRING 2002, S. 604). Die gleiche Stufung gilt auch für das Zusammenhangsmaß Kendall- τ bei monotonen Korrelationen.

Bei ordinalen und metrischen Daten werden zur paarweisen Untersuchung der Effektstärke Kennwerte für Vierfeldertafeln benutzt. Diese stammen aus der klinischen Forschung und kennzeichnen den relativen Erfolg zweier Behandlungsmethoden (vgl. BORTZ & LIENERT 1998, S. 225.). Dabei bezeichnet „rR“ die Misserfolgswahrscheinlichkeit (d.h. das relative Risiko einer schwächeren Merkmalsausprägung) in einer Untersuchungsgruppe gegenüber einer anderen, während „f“ die Wahrscheinlichkeit kennzeichnet, mit der der Misserfolg in einer Gruppe gegenüber einer anderen reduziert ist. „OR“ („Odd Ratio“) schließlich setzt die Erfolgs- und Misserfolgsquoten zweier Gruppen ins Verhältnis zueinander und macht deutlich, um welchen Faktor eine Untersuchungsgruppe einer anderen überlegen ist. Diese Kennziffern, die in der vorliegenden Studie besondere Aussagekraft besitzen, werden nur bei signifikant nachgewiesenen Merkmalsunterschieden ausgewertet.

5 Ergebnisse der Laborstudie

Die Gliederung dieses Kapitels folgt den drei deskriptiven Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.1.2) und den daraus abgeleiteten Forschungshypothesen (vgl. Kapitel 3.4.4 bis 3.4.6). Die Ergebnisse der Datenauswertung werden dabei zunächst überwiegend in Tabellen wiedergegeben, die eine genaue Nachvollziehbarkeit gewährleisten. Zusätzlich werden diese Ergebnisse in geeigneten Diagrammen dargestellt, die eine bessere und schnellere Übersicht bieten. Dabei werden die Ergebnisse jeweils nur kurz dahingehend interpretiert, ob sie die Forschungshypothesen bestätigen oder nicht. Eine ausführliche Interpretation der Ergebnisse erfolgt am Ende des Kapitels in 5.4.

5.1 Ausbildungseinfluss auf die Qualität der Konstruktionsergebnisse

Die erste Forschungsfrage betrifft den Einfluss der konstruktionsmethodischen Ausbildung auf die Qualität der Konstruktionsergebnisse, d.h. die Lösungsgüte in den drei untersuchten Kategorien (vgl. Kapitel 4.4). Es wurde erwartet (vgl. Kapitel 3.4.4), dass Studierende mit „frischer“ konstruktionsmethodischer Ausbildung auf dem Ausbildungsniveau A2 keine bessere Lösungsgüte erzielen als Studierende ohne konstruktionsmethodische Ausbildung auf dem Ausbildungsniveau A1. Auf dem Ausbildungsniveau A3 sollten sich die Konstruktionsergebnisse gegenüber der Ausgangsbasis jedoch verbessern. Bei den Kontrollgruppen sollte sich im gesamten Verlauf keine Veränderung zeigen. Diese Hypothesen wurden für alle drei Lösungsgütekategorien geprüft.

5.1.1 Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte in der Konzeptphase

Bei der Bewertung der Lösungsgüte der Konzeptaufgaben konnten maximal 60 Bewertungspunkte erreicht werden. Dabei konnten Lösungen oberhalb eines Niveaus von 30 Punkten vor dem Hintergrund des Ausbildungsniveaus und der mangelnden Praxiserfahrung der Versuchspersonen als sehr gute Lösungen eingestuft werden. Aufbauend auf dem verlaufsorientierten Gruppendesign wurden die Häufigkeitsverteilungen der Lösungsgüte in dieser Kategorie für alle Versuchs- und Kontrollgruppen ermittelt (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen der absoluten Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Lösungsgüte Konzeptphase (max. 60 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	25,51	26,56	27,85	27,60	32,33
Std.-fehler	1,18	1,90	1,93	2,98	3,32
Median	26	28	29	28	30
Std.-abw.	8,08	5,68	6,96	6,66	9,95
Minimum	7	14	9	21	23
Maximum	43	34	39	36	53

Wie in Abbildung 5-1 zu erkennen, konnte über alle drei Versuchszeitpunkte kein positiver Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung auf die Kompetenz zur Lösung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase beobachtet werden.

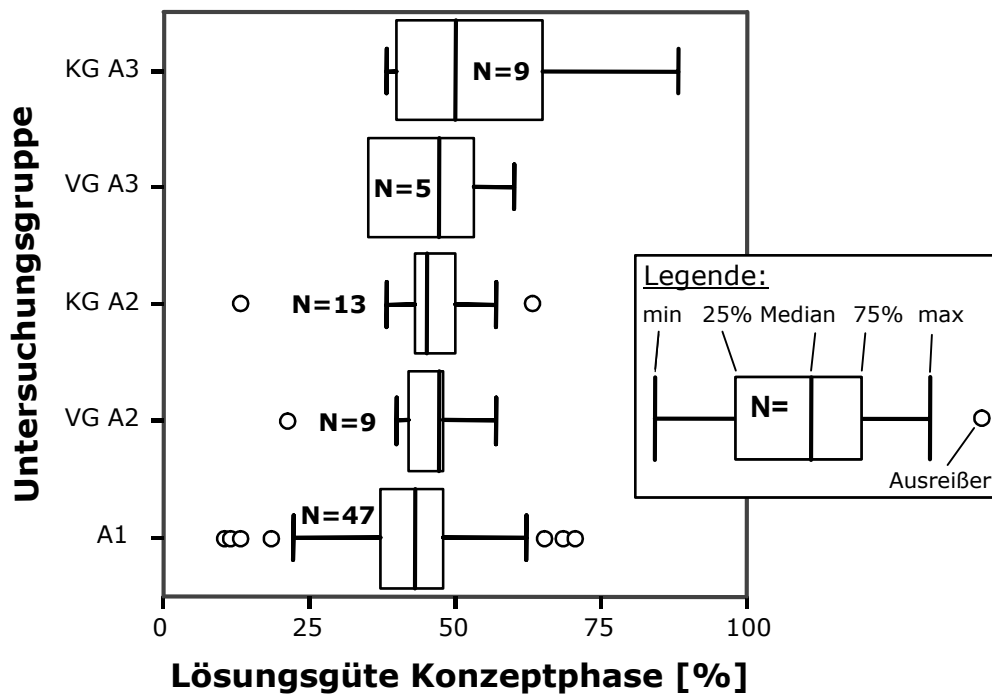


Abbildung 5-1: Boxplots der gruppenspezifischen relativen Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase³¹

So weisen weder die Versuchs- noch die Kontrollgruppe auf dem Ausbildungsniveau A2 eine signifikant bessere oder schlechtere Lösungsgüte gegenüber der die Baseline rep-

³¹ Fälle mit Werten, die um mehr als das 1,5-fache des Interquartilbereichs (entspricht der Boxlänge) vom unteren oder oberen Quartil entfernt liegen, werden in Boxplots als Ausreißer dargestellt. Dieses dient der besseren Visualisierung der tatsächlichen Lage der Datensätze. Die Ausreißer werden bei der weiteren statistischen Auswertung mit einbezogen.

räsentierenden Gruppe auf dem Ausbildungsniveau A1 bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase auf (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Unterschiede der Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Gruppenunterschiede Lösungsgüte Konzeptphase				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,918$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,599$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,788$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,608$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 1,000$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,893$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,196$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,130$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,275$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,103$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,546$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,461$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,385$	n.s.

Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothesen für den Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase nicht.

5.1.1.1 Ausbildungseinfluss auf die prozedurale Lösungsgüte in der Konzeptphase

Für das prozedurale Lösungsgütemerkmal "Güte der von den Versuchspersonen selbst vorgenommen Konzeptbewertung" (vgl. Kapitel 4.4.1.1) konnte ein Maximum von 40 Bewertungspunkten erzielt werden. In dieser Kategorie war die Lösungsgüte auf dem konstruktionsmethodischen Ausbildungsniveau A1 erwartungsgemäß überwiegend unbefriedigend (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen der absoluten prozeduralen Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

prozedurale Lösungsgüte Konzeptphase (max. 40 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	9,94	17,22	14,92	16,00	14,11
Std.-fehler	1,24	3,26	1,81	3,11	1,70
Median	9	18	16	13	15
Std.-abw.	8,49	9,77	6,51	6,96	5,09
Minimum	0	0	3	11	8
Maximum	31	35	28	28	22

Auf den Ausbildungsniveaus A2 und A3 kann zwar eine deutliche und signifikante Verbesserung beobachtet werden. Dabei zeigen die Versuchsgruppen mit konstruktionsmethodischer Ausbildung auf den Ausbildungsniveaus A2 und A3 jedoch eine uneinheitliche Tendenz zu größeren Lernfortschritten (Abbildung 5-2).

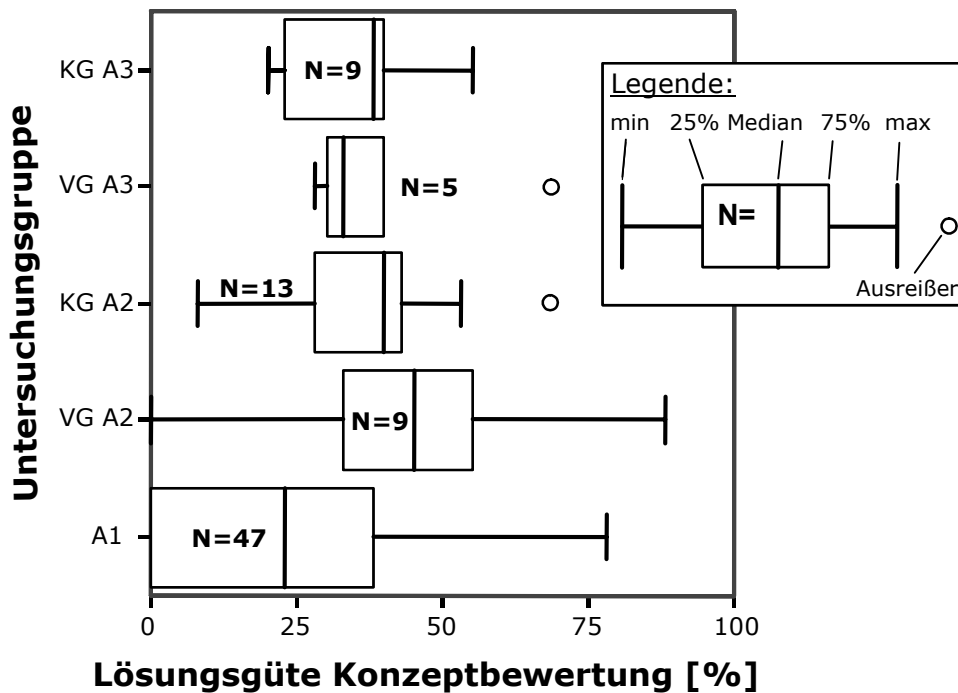


Abbildung 5-2: Boxplots der gruppenspezifischen relativen prozeduralen Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Die Streubreite der Ergebnisse ist vor allem auf dem Ausbildungsniveau A2 sehr groß, ohne dass sich Versuchs- und Kontrollgruppe signifikant unterscheiden. Auf dem Ausbildungsniveau A3 hat in beiden Gruppen die Bandbreite abgenommen, aber auch hier unterscheiden sich Versuchs- und Kontrollgruppe nicht signifikant.

Die Kompetenz, Lösungsvarianten zu beurteilen, wächst also in allen Gruppen deutlich; auf den konstruktionsmethodischen Ausbildungseinfluss zurückzuführende Einflüsse sind jedoch nicht signifikant nachweisbar (Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Unterschiede der prozeduralen Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Gruppenunterschiede prozedurale Lösungsgüte Konzeptphase				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,069$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,031^*$	S 5%
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,019^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,129$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,593$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,044^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,028^*$	S 5%
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,273$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,092$	T 10%
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,647$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,384$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,788$	n.s.

Auch für den Ausbildungseinfluss auf die prozedurale Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase können die Hypothesen nicht bestätigt werden.

5.1.2 Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase

Bei der Bewertung der Lösungsgüte der Entwurfsaufgaben konnten maximal 60 Bewertungspunkte erreicht werden. Die auf den verschiedenen Ausbildungsniveaus beobachteten Häufigkeitsverteilungen der Lösungsgüte sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen der absoluten Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Lösungsgüte Vorentwurfsphase (max. 60 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	36,81	39,33	36,46	44,00	39,44
Std.-fehler	1,17	2,86	2,59	1,87	2,11
Median	36	40,00	34	45	40
Std.-abw.	8,02	8,57	9,35	4,18	6,33
Minimum	24	27	24	38	30
Maximum	52	53	55	49	52

Gegenüber dem Ausgangsniveau der Ausbildung (A1) kann auf dem Ausbildungsniveau A2 eine im Mittel leichte Verbesserung der Lösungsgüte beobachtet werden. Auf dem Ausbildungsniveau A3 scheint sich gegenüber dem Ausgangsniveau eine deutliche Verbesserung einzustellen (Abbildung 5-3).

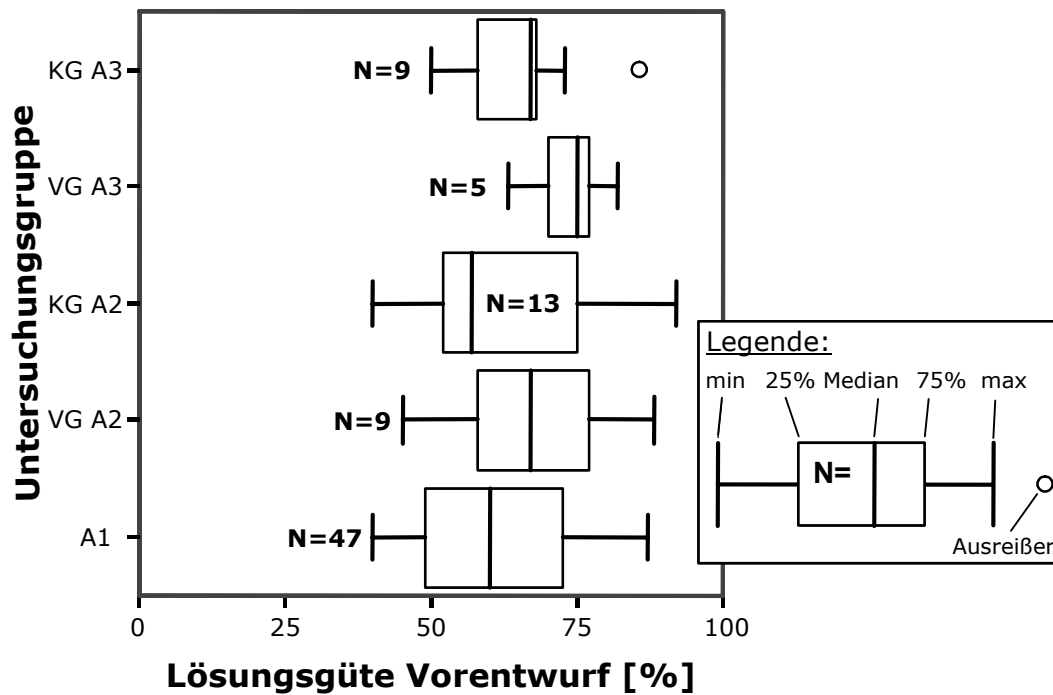


Abbildung 5-3: Boxplots der gruppenspezifischen relativen Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Der Einfluss frischer konstruktionsmethodischer Ausbildung auf die Lösungsgüte ist dabei jedoch nicht signifikant nachweisbar (Baseline A1 gegen Versuchsgruppe A2). Auch unterscheiden sich Versuchs- und Kontrollgruppe auf dem Ausbildungsniveau A2 nicht signifikant voneinander (Tabelle 5-6). Die „frische“ konstruktionsmethodische Ausbildung wird hier offenbar – wie erwartet – noch nicht handlungswirksam.

Tabelle 5-6: Unterschiede der Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Gruppenunterschiede Lösungsgüte Vorentwurfsphase				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,409$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,481$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,019^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,062$	T 10%
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,221$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,283$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,689$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,836$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,273$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,378$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,322$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,366$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,094$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,125$	n.s.

Demgegenüber unterscheidet sich die Lösungsgüte auf dem Ausbildungsniveau A3 signifikant vom Ausgangsniveau A1 und auch zwischen Versuchs- und Kontrollgruppe kann auf diesem Ausbildungsniveau zwar kein signifikanter Unterschied, aber doch eine Tendenz zu einer besseren Lösungsgüte in der Versuchsgruppe beobachtet werden. Vergleicht man außerdem die Lösungsgüte der Kontrollgruppen im Verlauf über alle Messpunkte, so zeigt sich hier keine signifikante Verbesserung der Lösungsgüte, was den Einfluss der konstruktionsmethodischen Ausbildung als unabhängige Variable weiter isoliert und untermauert.

Die Hypothesen für den Ausbildungseinfluss auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase können somit bestätigt werden.

5.2 Ausbildungseinfluss auf das tatsächlich beobachtete Vorgehen

Bei der Untersuchung des Ausbildungseinflusses auf die Lösungsgüte in den drei untersuchten Kategorien bleibt zunächst die Frage offen, ob die von den Versuchspersonen absolvierte konstruktionsmethodische Ausbildung überhaupt dazu führt, dass konstruktionsmethodische Handlungsempfehlungen auch tatsächlich befolgt werden. Diese zweite Forschungsfrage soll in diesem Kapitel näher untersucht werden.

Aufgrund theoretischer Vorüberlegungen (vgl. Kapitel 3.4.5) wird erwartet, dass Studierende mit „frischer“ konstruktionsmethodischer Ausbildung auf dem Ausbildungsniveau A2 den konstruktionsmethodischen Vorgehensempfehlungen im Gegensatz zu Versuchspersonen ohne konstruktionsmethodische Ausbildung auf dem Ausbildungsniveau A1 gar nicht oder eher formal und streng hierarchisch folgen. Auf dem Ausbildungsniveau A3 sollte aufgrund erfolgter Internalisierung und Prozeduralisierung eine eher fle-

xible – d.h. vom streng hierarchischen Vorgehen abweichende – Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen zu beobachten sein.

5.2.1 Ausbildungseinfluss auf das Vorgehen in der Konzeptphase

Zur Analyse des Vorgehens in der Konzeptphase wurde die Häufigkeit des Auftretens von Basisoperationen, die sich aus dem konstruktionsmethodischen Vorgehensmodell ergeben, mittels eines standardisierten Auswerteschemas erhoben (vgl. Kapitel 4.3.1). Dabei konnte eine Versuchsperson, die alle den erwarteten Basisoperationen zugeordneten 14 Methoden tatsächlich einsetzte, maximal 28 Vorgehenspunkte erhalten. Die hier erreichte Punktzahl ergibt – ins Verhältnis zur möglichen Gesamtpunktzahl gesetzt – einen „Methodikkennwert“, der als globales Maß der Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen in den lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens angesehen werden kann (Tabelle 5-7).

Die abschließende Teilphase der *Lösungsbeurteilung und Entscheidung* wird auf der Basis der für diese Kategorie vorgenommenen Lösungsgütebeurteilung gesondert ausgewertet (vgl. 5.2.1.1).

Tabelle 5-7: Gruppenspezifische absolute Häufigkeitsverteilungen des „Methodikkennwerts“ für die Konzeptphase

„Methodikkennwert“ in der Konzeptphase (max. 28 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	8,55	8,33	7,08	15,00	5,78
Std.-fehler	0,56	1,44	0,96	2,35	0,81
Median	8,00	7,00	7,00	17,00	6,00
Std.-abw.	3,86	4,33	3,48	5,24	2,44
Minimum	3	4	2	6	3
Maximum	19	15	15	19	9

Hier ist deutlich zu erkennen, dass sich der Methodikwert auf dem Ausbildungsniveau A3 in der Versuchsgruppe deutlich von den Werten in den anderen Gruppen unterscheidet (Abbildung 5-4).

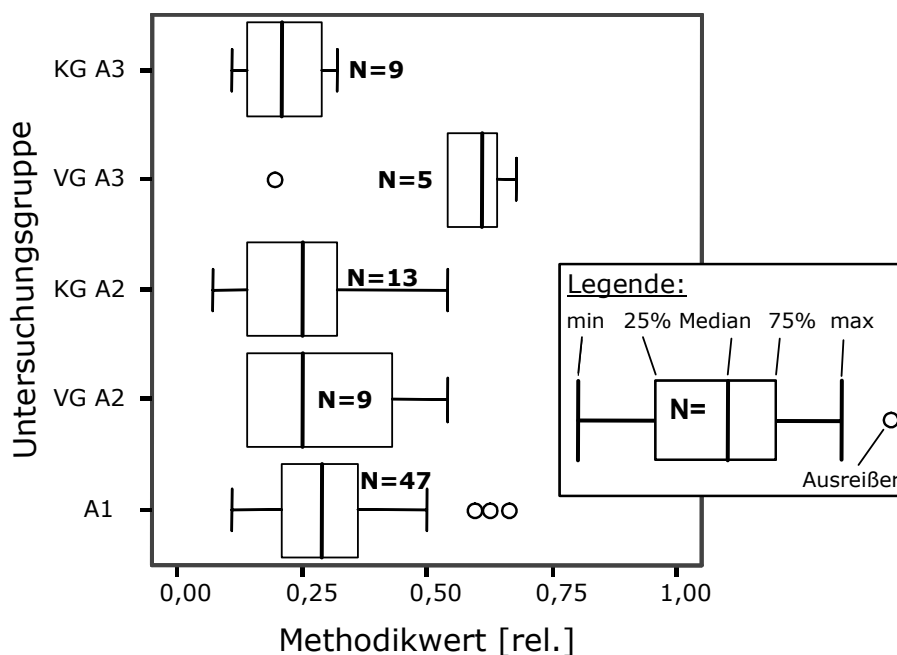


Abbildung 5-4: Boxplots der gruppenspezifischen relativen Häufigkeitsverteilungen des „Methodikwerts“ für die Konzeptphase

Diese Unterschiede sind signifikant nachweisbar (Tabelle 5-8). Der Methodikwert ist auf dem Ausbildungsniveau A3 signifikant höher als auf den Ausbildungsniveaus A1 und A2. Auch gegenüber der Kontrollgruppe auf gleichem Ausbildungsniveau liegt der Methodikwert in A3 signifikant höher. Interessanterweise zeigt die Kontrollgruppe auf dem Ausbildungsniveau A3 sogar einen signifikant kleineren Wert im Vergleich zum Ausgangsniveau.

Tabelle 5-8: Vorgehensunterschiede gemessen am „Methodikwert“ in der Konzeptphase

Gruppenunterschiede „Methodikwert“ Konzeptphase				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,599$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,779$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,110$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,016^*$	S 5%
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,094$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,032^*$	S 5%
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,504$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,241$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,275$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,037^*$	S 5%
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,363$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,660$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,094$	T 10%
	H-Test	$\alpha = 0,013^*$	S 5%	

Auf dem Ausbildungsniveau A2 dagegen ist ein Vorgehensunterschied weder gegenüber dem Ausgangsniveau A1 noch zwischen Versuchs- und Kontrollgruppe zu beobachten. Eine frische konstruktionsmethodische Ausbildung wird also offenkundig noch nicht handlungswirksam, während eine vertiefte Ausbildung das Vorgehen nachhaltig in Richtung auf eine Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen beeinflusst.

Die Ergebnisse der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase profitieren davon allerdings nicht (vgl. 5.1.1). Da die Versuche in der vorliegenden Studie unter Zeitbegrenzung stattfanden (Leistungstest) muss hier offen bleiben, ob dies ggf. daran liegt, dass das methodische Vorgehen zeitaufwändiger und damit weniger effizient ist, obwohl diese Spekulation nahe liegt. Letzten Aufschluss könnten hier nur Vergleichsexperimente ohne Zeitbegrenzung (Geschwindigkeitstests) geben.

Weitergehende Aussagen liefert die Untersuchung, wie vollständig der im konstruktionsmethodischen Vorgehensmodell vorgegebene Prozess in der Konzeptphase durchlaufen wurde. Ein Maß hierfür ist, wie intensiv die Versuchspersonen jeweils die elementaren Teilphasen des Konzipierens „besuchten“. Hierzu werden so genannte Phasenvisits ausgewertet, d.h. die Vorgehenspunktzahl, die jeweils innerhalb der drei lösungserzeugenden Hauptphasen des Konzipierens – *Information*, *Kreation* und *Definition* – erreicht wurde (Tabelle 5-9).

Tabelle 5-9: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen der Phasenvisits in der Konzeptphase³²

Phasenvisits in der Konzeptphase					
Teilphase <i>Information</i> (max. 2 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	0,70	0,22	0,23	1,20	0,33
Std.-fehler	0,13	0,22	0,17	0,49	0,24
Median	0	0	0	2	0
Std.-abw.	0,88	0,67	0,60	1,10	0,71
Minimum	0	0	0	0	0
Maximum	2	2	2	2	2
Teilphase <i>Definition</i> (max. 6 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	1,64	1,67	0,92	4,20	0,33
Std.-fehler	0,27	0,78	0,33	0,86	0,24
Median	1	0	0	5	0
Std.-abw.	1,84	2,35	1,19	1,92	0,71
Minimum	0	0	0	1	0
Maximum	6	6	3	6	2

weiter nächste Seite!

³² Die Häufigkeitsverteilungen für die Teilphase „Information“ werden hier nur als Anhaltspunkt wiedergegeben. Die Ausprägung dieses ordinalen Merkmals lässt sich aufgrund des beschränkten Wertebereichs (0; 1; 2) und den tatsächlich auftretenden Häufigkeitsverteilungen nicht valide ordinal auswerten. Auch eine grafische Darstellung als Boxplot ist hier sinnlos. Diese Teilphase wird deshalb in der weiteren Auswertung wie ein nominal skaliertes Merkmal behandelt.

Teilphase *Kreation* (max. 20 Bewertungspunkte)

	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	6,21	6,44	5,92	9,60	5,11
Std.-fehler	0,31	0,75	0,65	1,40	0,68
Median	6	7	6	11	4
Std.-abw.	2,1	2,24	2,33	3,13	2,03
Minimum	3	4	2	5	3
Maximum	11	10	10	13	9

Die Häufigkeitsverteilungen legen den Schluss nahe, dass sich die stärkere Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen auf dem Ausbildungsniveau A3 in allen lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens widerspiegelt.

- **Teilphase *Information***

Für die Teilphase *Information* wird dieser Unterschied allerdings nicht signifikant (Tabelle 5-10) sondern ist nur als schwache Tendenz beobachtbar.

Tabelle 5-10: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Information“ in der Konzeptphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Konzeptphase				
Teilphase <i>Information</i> (max. 2 Bewertungspunkte)				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,186$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,283$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,149$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,190$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,492$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,920$	n.s.
Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,680$	n.s.
	VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,138$	n.s.

Auffällig ist trotzdem, dass in allen Untersuchungsgruppen mit Ausnahme der Versuchsgruppe auf dem Ausbildungsniveau A3 eine deutliche Mehrheit der Versuchspersonen überhaupt keine beobachtbaren Aktivitäten in diesem Bereich unternehmen (Tabelle 5-11). In der Versuchsgruppe auf dem Ausbildungsniveau A3 führt eine Mehrheit der Versuchspersonen diese Aktivitäten umfassend aus.

Tabelle 5-11: Gruppenspezifische Kreuztabelle für die absoluten Häufigkeiten von Phasenvisits in der Teilphase „Information“

VP-Gruppe	Teilphase Information		
	nicht ausgeführt	zum Teil ausgeführt	umfassend ausgeführt
A1 (N = 47)	27	7	13
VG A2 (N= 9)	8	0	1
KG A2 (N = 13)	11	1	1
VG A3 (N = 5)	2	0	3
KG A3 (N = 9)	7	1	1
Σ	55	9	19

Auf dem Ausbildungsniveau A1 unternimmt ein im Vergleich relativ größerer Anteil von Versuchspersonen (immerhin ca. 43 %) Aktivitäten auf diesem Gebiet, was – spekulativ aber plausibel – mit einem höheren Informationsbedarf aufgrund des niedrigeren Ausbildungsniveaus erklärt werden kann.

- **Teilphasen *Definition* und *Kreation***

In den anderen – lösungserzeugenden – Teilphasen tritt die stärkere Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen auf dem Ausbildungsniveau A3 wieder deutlich zu Tage. Dieses wird besonders deutlich für die Teilphase *Definition* (Abbildung 5-5).

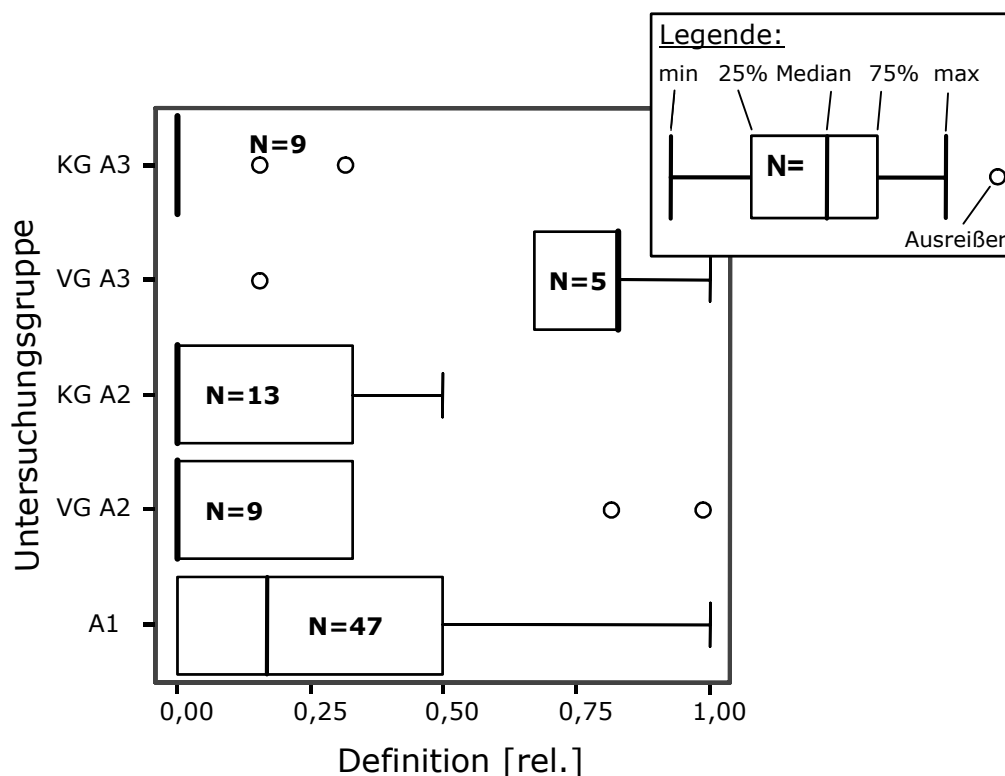


Abbildung 5-5: Boxplots der gruppenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der Phasenvisits für die Teilphase „Definition“

Auch für die Teilphase *Kreation* ist eine stärkere Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen auf dem Ausbildungsniveau A3 zu beobachten (Abbildung 5-6).

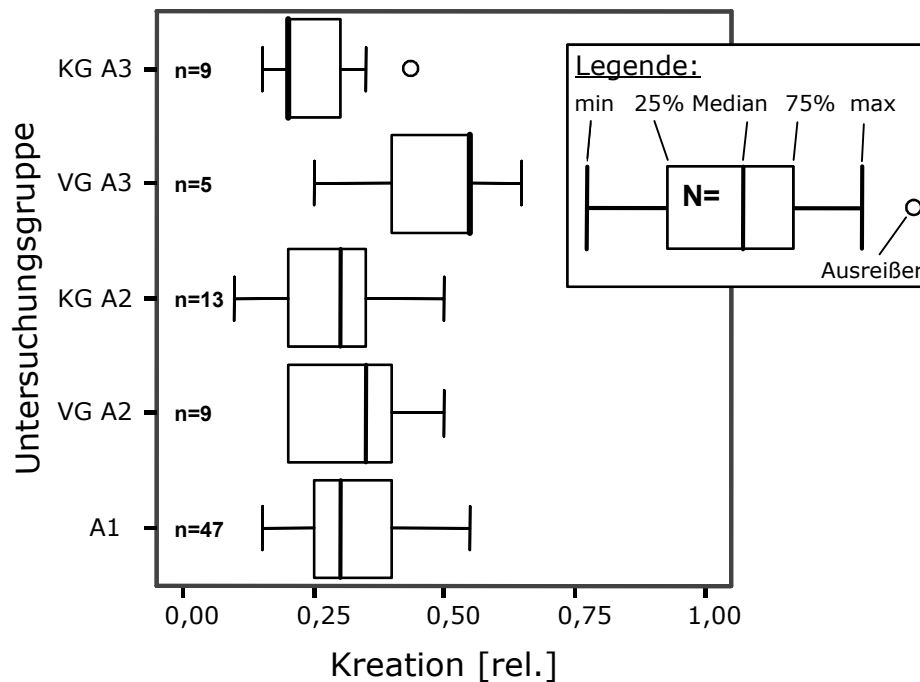


Abbildung 5-6: Boxplots der gruppenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der Phasenvisits für die Teilphase „Kreation“

In beiden Teilphasen werden die Unterschiede zwischen der Versuchsgruppe aus A3 und den anderen Gruppen auch wieder signifikant. Für die Teilphase *Definition* wird zudem deutlich, dass die Kontrollgruppe aus A3 gegenüber der Versuchsgruppe, aber auch gegenüber der Baseline aus A1, signifikant nach unten abweicht, (Tabelle 5-12).

Tabelle 5-12: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Definition“ in der Konzeptphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Konzeptphase				
Teilphase <i>Definition</i> (max. 6 Bewertungspunkte)				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,666$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,733$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,158$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,011^*$	S 5%
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,079$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,074$	T 10%
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,344$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,260$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,038^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,032^*$	S 5%
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,214$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,714$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,005^{**}$	S 1%
		H-Test	$\alpha = 0,003^{**}$	S 1%

Diese Teilphase, in der die Abstraktion und eigentliche Problemdekomposition stattfindet, hat offenkundig den größten Anteil an der gleichartigen Abweichung dieser Kontrollgruppe im methodischen Vorgehen insgesamt (vgl. Tabelle 5-8). Dieses kann – wiederum spekulativ – mit dem wachsenden zeitlichen Abstand auch zur fachlichen Konstruktionsausbildung auf dem Niveau A1 erklärt werden, der durch längere Nichtbefassung nicht nur mit Methoden sondern auch mit Inhalten des Entwickeln und Konstruierens hier zu einem Verlust von Fähigkeiten führen mag.

In der Teilphase *Kreation* (Tabelle 5-13) ergibt sich das gleiche Bild. Die Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen ist auf dem Ausbildungsniveau A3 signifikant ausgeprägter.

Tabelle 5-13: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Kreation“ in der Konzeptphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Konzeptphase				
Teilphase <i>Kreation</i> (max. 20 Bewertungspunkte)				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,566$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,865$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,140$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,019^*$	S 5%
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,065$	T 10%.
		H-Test	$\alpha = 0,049$	S 5%
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,979$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,703$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,417$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,136$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,325$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,564$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,079$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,019$	S 5%

Es ist deutlich erkennbar, dass eine frische und rein theoretisch vermittelte konstruktionsmethodische Ausbildung hier für das Vorgehen insgesamt und auch für alle lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens nicht handlungswirksam wird. Im Gegensatz dazu wirkt die Vertiefung dieser Ausbildung sich sehr deutlich auf das tatsächliche Vorgehen aus.

Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothesen über den Ausbildungseinfluss auf das tatsächlich beobachtbare Vorgehen in der Konzeptphase in vollem Umfang.

5.2.1.1 Ausbildungseinfluss auf das Vorgehen bei der Beurteilung und Auswahl von Konzeptvarianten

Von besonderer Bedeutung in der Konzeptphase sind die abschließende Beurteilung der ausgearbeiteten Konzeptvarianten und die Auswahlentscheidung für die weiter zu verfolgende(n) Lösung(en). Die Qualität dieses Arbeitsschrittes wurde deshalb im Rahmen der Beurteilung der prozeduralen Lösungsgüte in der Konzeptphase besonders detailliert untersucht (vgl. Kapitel 4.4.1.1). Dabei wurde u.a. erhoben,

- ob die im konstruktionsmethodischen Vorgehensmodell vorgesehenen *systematischen Teilschritte* der Beurteilung von Lösungsvarianten befolgt wurden (max. 14 Bewertungspunkte);
- ob bei der Beurteilung der Lösungsvarianten einschlägige *technisch-wirtschaftliche* Kriterien berücksichtigt wurden (max. 10 Bewertungspunkte).

Die erreichten Bewertungspunktzahlen bezüglich dieser Indikatoren sind ein Maß für das Befolgen konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen in der Teilphase *Beurteilung/ Entscheidung* (Tabelle 5-14).

Tabelle 5-14: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen für die Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen bei der Beurteilung von Lösungsvarianten

Indikator „systematische Teilschritte“ (max. 14 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	2,11	4,11	2,85	3,60	3,00
Std.-fehler	0,34	1,31	0,59	1,21	0,75
Median	1	3	2	3	2
Std.-abw.	2,31	3,92	2,12	2,70	2,24
Minimum	0	0	1	1	1
Maximum	9	12	8	8	7
Indikator „technisch-wirtschaftliche Kriterien“ (max. 10 Bewertungspunkte)					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	2,00	3,56	3,15	3,20	3,11
Std.-fehler	0,32	0,69	0,68	0,97	0,72
Median	1	3	3	2	3
Std.-abw.	2,16	2,07	2,44	2,17	2,15
Minimum	0	0	0	1	1
Maximum	8	7	8	6	8

Die Häufigkeiten der Ausführung systematischer Teilschritte und der Berücksichtigung einschlägiger technisch-wirtschaftlicher Kriterien zeigen ein uneinheitliches Bild, das keine systematische Beeinflussung des Vorgehens bei der Konzeptbewertung durch die konstruktionsmethodische Ausbildung nahe legt (Abbildung 5-7).

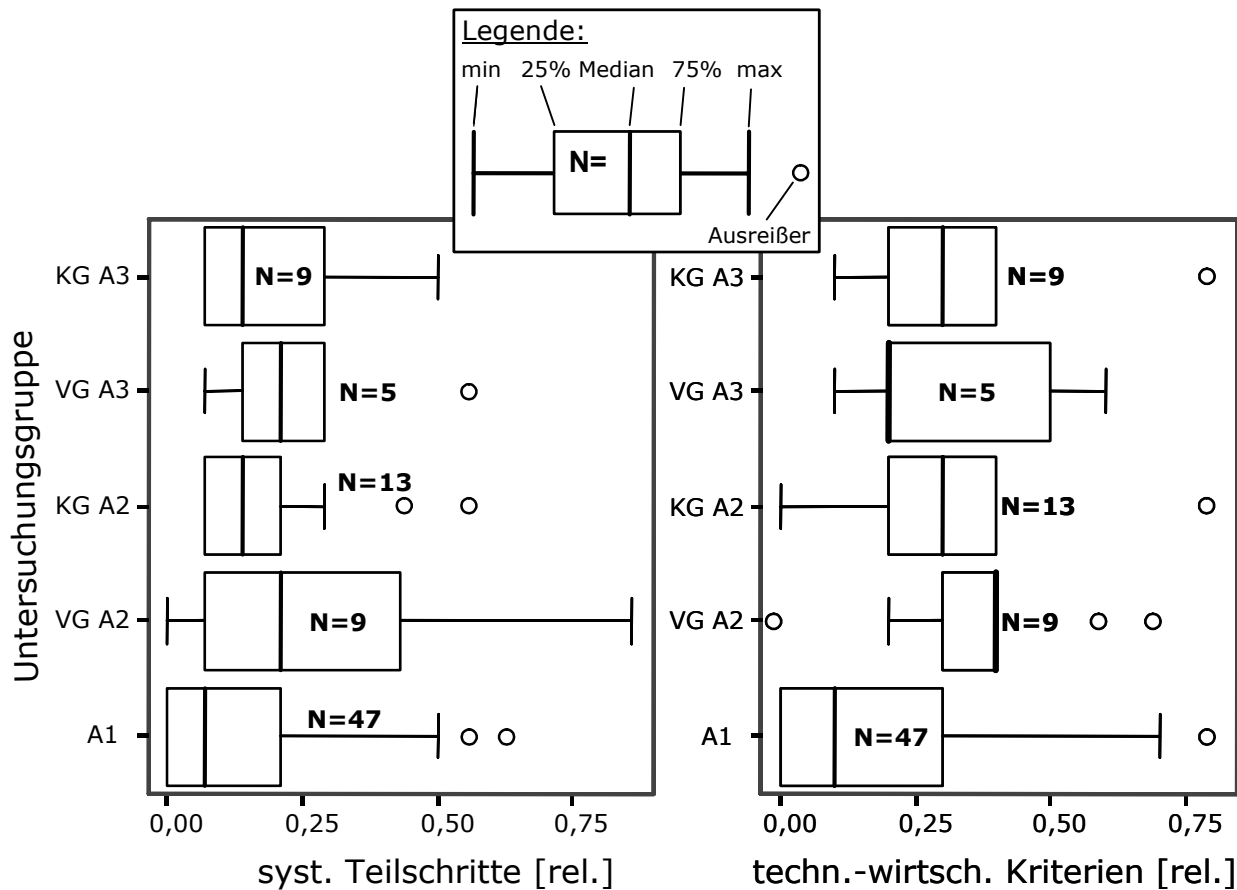


Abbildung 5-7: Boxplots der gruppenspezifischen Häufigkeitsverteilungen bei der Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen bei der Beurteilung von Lösungsvarianten

Es scheint lediglich, als würden auf dem Ausgangsniveau A1 im Vergleich zu allen anderen Gruppen systematische Teilschritte seltener ausgeführt und technisch-wirtschaftliche Kriterien seltener berücksichtigt; diese Unterschiede werden aber in den meisten Fällen nicht signifikant (Tabelle 5-15). Insbesondere ist ein systematischer Einfluss der konstruktionsmethodischen Ausbildung auf das Vorgehen nicht nachweisbar, da sich Versuchs- und Kontrollgruppen auf keinem Ausbildungsniveau signifikant unterscheiden.

Tabelle 5-15: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede bei der Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen bei der Beurteilung von Lösungsvarianten

Indikator „systematische Teilschritte“				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,210$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,115$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,158$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,125$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,872$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,946$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,219$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,120$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,355$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,166$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,945$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,635$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,587$	n.s.
Indikator „technisch-wirtschaftliche Kriterien“				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,010^{**}$	S 1%
		H-Test	$\alpha = 0,036^*$	S 5%
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,114$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,145$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 1,000$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,590$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,068$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,071$	T 10%
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,069$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,078$	T 10%
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,919$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,455$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,946$	n.s.

Es scheint somit, dass im weiteren Ausbildungsfortschritt ganz allgemein eine Tendenz zu systematischerem Vorgehen und zu einer inhaltlich umfassenderen Beurteilung von Lösungsvarianten beobachtet werden kann, die jedoch offenbar eher auf eine allgemein höhere Handlungs- bzw. Problemlösekompetenz und nicht auf die konstruktionsmethodische Ausbildung zurückzuführen ist.

Die Hypothesen für den Ausbildungseinfluss auf das tatsächlich beobachtbare Vorgehen bei der Beurteilung und Auswahl von Lösungsvarianten können somit nicht bestätigt werden.

5.2.2 Ausbildungseinfluss auf das Vorgehen in der frühen Entwurfsphase

Das für die Vorgehensanalyse in der Vorentwurfsphase zur Verfügung stehende Datenmaterial enthält neben Daten zur Häufigkeit beobachteter Basisoperationen auch detaillierte Informationen über den zeitlichen Verlauf der Auftragsbearbeitung.

Die Analyse des Ausbildungseinflusses auf das tatsächlich realisierte Vorgehen in der Vorentwurfsphase geschieht in zwei Stufen:

- Wie bei der Vorgehensanalyse in der Konzeptphase werden zunächst Phasenvisits, d.h. die Häufigkeit der Ausführung von Basisoperationen aus vordefinierten Teilphasen des Entwerfens in den verschiedenen Untersuchungsgruppen ausgewertet (Kapitel 5.2.2.1).
- Auf der Basis der Auszählung der Sprungweiten beim Übergang zwischen zwei Basisoperationen und der Auswertung der Information, ob bei diesem Übergang das bearbeitete Objekt wechselt, werden die Versuchspersonen Vorgehenstypen zugeordnet (vgl. Kapitel 4.3.2). Die Häufigkeit des Auftretens dieser Vorgehenstypen in den Untersuchungsgruppen wird anschließend ausgewertet (Kapitel 5.2.2.2).

5.2.2.1 Ausbildungseinfluss auf Phasenvisits in der Vorentwurfsphase

Für die Vorentwurfsphase wurden 13 hypothetische Basisoperationen in den fünf Teilphasen

- Aufgabe klären,
- Konzipieren,
- Grobgestalten,
- Feingestalten,
- Vervollständigen und Kontrollieren

definiert (vgl. Kapitel 3.4.2). Auch hier kann die Häufigkeit des „Besuchs“ dieser Teilphasen (Phasenvisits) durch die Versuchspersonen bei der Bearbeitung der Konstruktionsaufträge aus der Vorentwurfsphase als Maß für den zeitlichen Aufwand, den die Versuchspersonen auf diese Teilphasen verwenden, interpretiert werden. Die Häufigkeitsverteilungen für die relativen³³ Phasenvisits sind in Tabelle 5-16 wiedergegeben.

³³ Aufgrund des unterschiedlichen Beobachtungsintervalls in A1 im Vergleich zu den beiden anderen Untersuchungsstufen werden hier nur relative Häufigkeiten verwendet.

Tabelle 5-16: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen der relativen Phasenvisits für die Vorentwurfsphase (alle Werte in [%])³⁴

relative Phasenvisits in der Vorentwurfsphase					
Teilphase „Aufgabenklärung und Konzept“					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	2,00	3,00	1,08	1,40	0,56
Std.-fehler	0,54	0,73	0,53	0,87	0,38
Median	0	3	0	0	0
Std.-abw.	3,68	2,18	1,89	1,95	1,13
Minimum	0	0	0	0	0
Maximum	12	7	6	4	3
Teilphase „Grobgestalten“					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	17,81	26,11	22,23	20,20	24,22
Std.-fehler	1,31	3,42	2,96	5,65	3,67
Median	16	27	20	14	27
Std.-abw.	8,96	10,25	10,66	12,64	11,01
Minimum	0	13	9	8	5
Maximum	38	48	43	39	37

³⁴ Die Teilphasen „Aufgabe klären“ und „Konzipieren“, die nur aus jeweils einer Basisoperation bestehen, werden hier zu „Aufgabenklärung und Konzept“ zusammengefasst. Die Häufigkeitsverteilungen werden nur aus Gründen der Übersicht angegeben. Eine ordinale Auswertung ist hier wenig valide, weshalb diese beiden Variablen bei der weiteren Auswertung wie nominale Variablen behandelt werden.

relative Phasenvisits in der Vorentwurfsphase					
Teilphase „Feingestalten“					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	36,04	35,44	38,31	38,40	39,00
Std.-fehler	1,48	2,65	2,44	2,34	3,22
Median	35	37	36,00	39	40
Std.-abw.	10,12	7,96	8,78	5,23	9,67
Minimum	22	24	29	30	26
Maximum	67	47	60	44	57

Teilphase „Vervollständigen und Kontrollieren“					
	A1	A2		A3	
	Baseline (N=47)	Versuchsgruppe (N=9)	Kontrollgruppe (N=13)	Versuchsgruppe (N=5)	Kontrollgruppe (N=9)
Mittelwert	44,38	35,56	38,15	40,20	36,22
Std.-fehler	1,98	3,50	3,44	5,83	4,71
Median	47	35	43	44	40
Std.-abw.	13,59	10,51	12,41	13,03	14,14
Minimum	11	22	17	19	6
Maximum	69	47	53	54	50

Für die Teilphasen „Aufgabe klären“ und „Konzipieren“ ergeben sich über alle Untersuchungsgruppen für die Mehrheit der Versuchspersonen sehr niedrige Werte. Das erscheint angesichts der konkreten Anforderungshöhe der Konstruktionsaufträge für die Vorentwurfsphase auch ein durchaus angemessener Umfang (vgl. Kapitel 4.1.4.3).

Dabei unterscheiden sich die Untersuchungsgruppen überwiegend nicht signifikant voneinander (Tabelle 5-17).

Tabelle 5-17: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Aufgabenklärung und Konzept“ in der Vorentwurfsphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Vorentwurfsphase				
Teilphase „Aufgabenklärung und Konzept“				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,001^{**}$	S 1%
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,370$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,910$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,230$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,449$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 1,000$	n.s.
Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,057$	T 10%.
	VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,664$	n.s.

Lediglich auf dem Ausbildungsniveau A2 zeichnet sich für die Versuchsgruppe eine Tendenz zu intensiverer Aufgabenklärung ab, die allerdings auf dem Ausbildungsniveau A3 wieder vollständig verschwindet.

Ähnlich verhält es sich für die drei folgenden Teilphasen des Entwerfens.

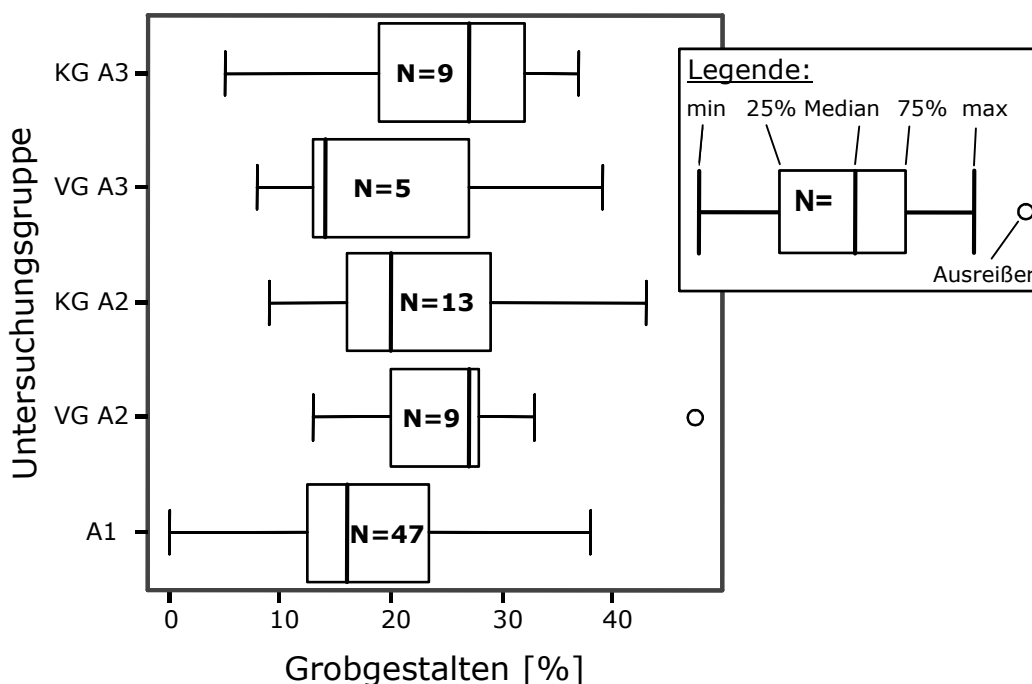


Abbildung 5-8: Boxplots der gruppenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der relativen Phasenvisits für die Teilphase „Grobgestalten“ in der Vorentwurfsphase

In der Teilphase „Grobgestalten“ (Abbildung 5-8). liegt die Versuchsgruppe aus A2 auch hier über dem Ausgangsniveau A1, unterscheidet sich aber nicht signifikant von der parallelen Kontrollgruppe (Tabelle 5-18).

Tabelle 5-18: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Grobgestalten“ in der Vorentwurfsphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Vorentwurfsphase				
Teilphase „Grobgestalten“				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,029^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,023^*$	S 5%
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,637$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,889$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,283$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,429$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,199$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,077$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,092$	T 10%
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,592$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,332$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,593$	n.s.

Auch in der Teilphase „Feingestalten“ ergibt sich ein sehr ausgeglichenes Bild (Abbildung 5-9).

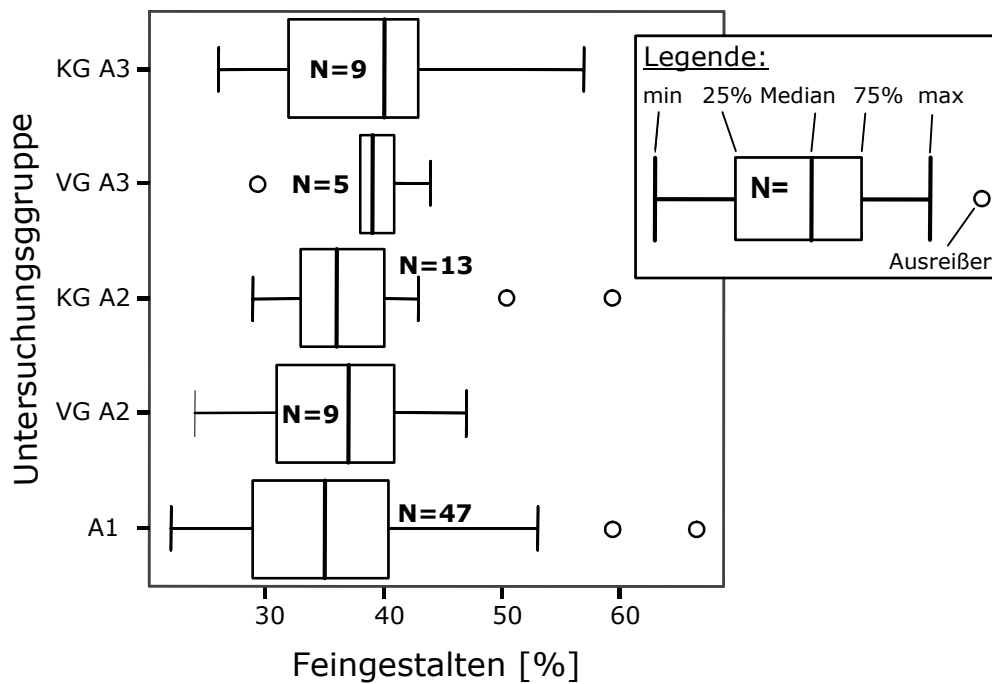


Abbildung 5-9: Boxplots der gruppenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der relativen Phasenvisits für die Teilphase „Feingestalten“ in der Vorentwurfsphase

Hier hebt sich keine Gruppe von einer anderen signifikant ab (Tabelle 5-19).

Tabelle 5-19: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Feingestalten“ in der Vorentwurfsphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Vorentwurfsphase				
Teilphase „Feingestalten“				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,863$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,849$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,158$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,305$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,429$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,503$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,380$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,355$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,275$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,274$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,688$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,616$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,789$	n.s.

Auch in der abschließenden Teilphase „Vervollständigen und Kontrollieren“ kann ein Einfluss der konstruktionsmethodischen Ausbildung auf das Vorgehen nicht nachgewiesen werden. Alle Gruppen liegen hier nahe beieinander, wobei sich allerdings die Spreizung der Verteilung z.T. deutlich unterscheidet (Abbildung 5-10).

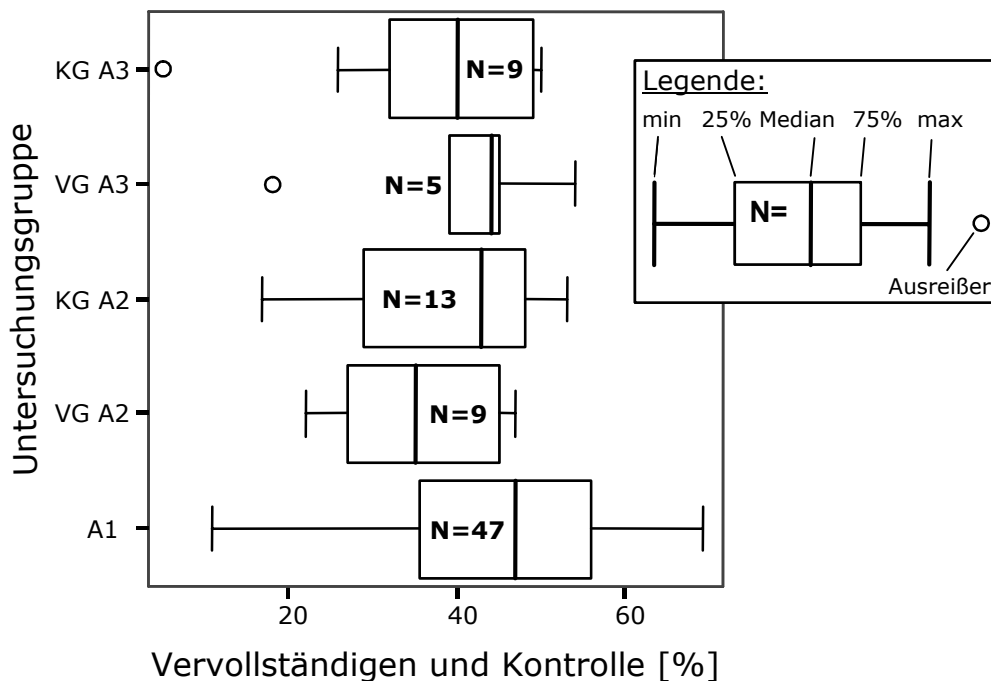


Abbildung 5-10: Boxplots der gruppenspezifischen Häufigkeitsverteilungen der relativen Phasenvisits für die Teilphase „Vervollständigen und Kontrollieren“ in der Vorentwurfsphase

Auch hier lässt sich nur auf dem Ausbildungsniveau A2 ein tendenzieller Unterschied zum Ausgangsniveau beobachten, ohne dass sich dies auch in einem Unterschied zur Kontrollgruppe niederschlagen würde (Tabelle 5-20).

Tabelle 5-20: Gruppenspezifische Vorgehensunterschiede gemessen an Phasenvisits in der Teilphase „Vervollständigen und Kontrollieren“ in der Vorentwurfsphase

Gruppenunterschiede Phasenvisits in der Vorentwurfsphase				
Teilphase „Vervollständigen und Kontrollieren“				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,275$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,038^*$	S 5%
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,158$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,514$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,639$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	Mediantest	$\alpha = 0,347$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,108$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	Mediantest	$\alpha = 0,275$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,108$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	U-Test	$\alpha = 0,867$	n.s.
	Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,483$
VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)		Mediantest	$\alpha = 0,577$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,640$	n.s.

Auf der Basis der Häufigkeit, mit der bestimmte Teilphasen des Entwerfens von den Versuchspersonen besucht wurden, kann somit kein systematischer Einfluss der konstruktionsmethodischen Ausbildung beobachtet werden. Lediglich die Gruppe mit frischer konstruktionsmethodischer Ausbildung auf dem Ausbildungsniveau A2 scheint im Vergleich zu den anderen Gruppen etwas länger in der Phase der Aufgabenklärung zu verbleiben und dafür weniger Aufmerksamkeit dem Vervollständigen und Kontrollieren zuzuwenden, jedoch nicht in einem wirklich relevanten Umfang und auch ohne sich von der parallelen Kontrollgruppe abzuheben.

Die Hypothesen für den Ausbildungseinfluss auf das tatsächlich beobachtbare Vorgehen in der Vorentwurfsphase können somit nicht bestätigt werden.

5.2.2.2 Ausbildungseinfluss auf die Ausprägung von Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase

In 3.4.3 wurden aufbauend auf theoretischen Überlegungen vier hypothetische Vorgehenstypen definiert. Die Identifikation dieser Vorgehenstypen aus dem erhobenen Datenmaterial wurde mittels einer angepassten Form der Übergangsmatrix nach FRICKE 1993 valide operationalisiert (vgl. Kapitel 4.3.2). Es wurden dabei Anzahl und Weite von Vor- und Rücksprüngen im Vorgehen – gemessen am Referenzprozess für die Vorent-

wurfsphase (vgl. Kapitel 3.4.2) – ausgewertet und dabei zusätzlich betrachtet, ob bei einem Sprung im Vorgehen die dabei behandelte Konstruktionsbaugruppe gleichzeitig wechselte oder nicht. Anschließend wurden mittlere Sprungweiten mit und ohne Baugruppenwechsel ermittelt, die in einem Portfoliodiagramm aufgetragen wurden (vgl. Abbildung 4-16, S. 150). Hypothesen darüber, ab welcher mittleren Sprungweite ein Vorgehenstyp in einen anderen übergeht, standen nicht zur Verfügung. Es wurde deshalb ein datengesteuerter Zugang gewählt, der im Ergebnis darauf führte, dass sich die hypothetischen Vorgehenstypen im vorliegenden Datensatz dann am trennschärfsten abgrenzen ließen, wenn man eine Dichotomisierung entlang der unteren Quartile der mittleren Sprungweiten vornahm. In diesem Falle konnte in Bezug auf Unterschiede in der erreichten Lösungsgüte ein über alle vier Vorgehenstypen signifikanter Haupteffekt identifiziert werden (vgl. Tabelle 5-31, S. 214), der sich aus sehr deutlichen Einzelkontrasten zwischen bestimmten Vorgehenstypen zusammensetzt.

Das Auftreten der so bestimmten vier Vorgehenstypen in den fünf Untersuchungsgruppen ist in Tabelle 5-21 wiedergegeben.

Tabelle 5-21: Gruppenspezifische Häufigkeit des Auftretens von Vorgehenstypen (absolut und relativ) in der Vorentwurfsphase

Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase										
	A1		A2				A3			
	Baseline (N=47)		Versuchsgruppe (N=9)		Kontrollgruppe (N=13)		Versuchsgruppe (N=5)		Kontrollgruppe (N=9)	
	abs	%	abs	%	abs	%	abs	%	abs	%
hierarchisch-prozessorientiert	6	12,8	0	0	2	15,4	0	0	0	0
hierarchisch objektorientiert	12	25,5	0	0	0	0	1	20,0	1	11,1
opportunistisch-assoziativ	4	8,5	3	33,3	2	15,4	2	40,0	2	22,2
rein probierend	25	53,2	6	66,7	9	69,2	2	40,0	6	66,7

Abbildung 5-11 veranschaulicht die Anteile der jeweiligen Vorgehenstypen in den einzelnen Untersuchungsgruppen. Eine deutliche Häufung eines Vorgehenstypus in einer der Gruppen kann hier nicht beobachtet werden. Auffällig ist jedoch, dass mit Ausnahme des Ausgangsniveaus A1 der hierarchisch-prozessorientierte Vorgehenstyp nur noch in der Kontrollgruppe auf dem Ausbildungsniveau A2 beobachtet werden kann.

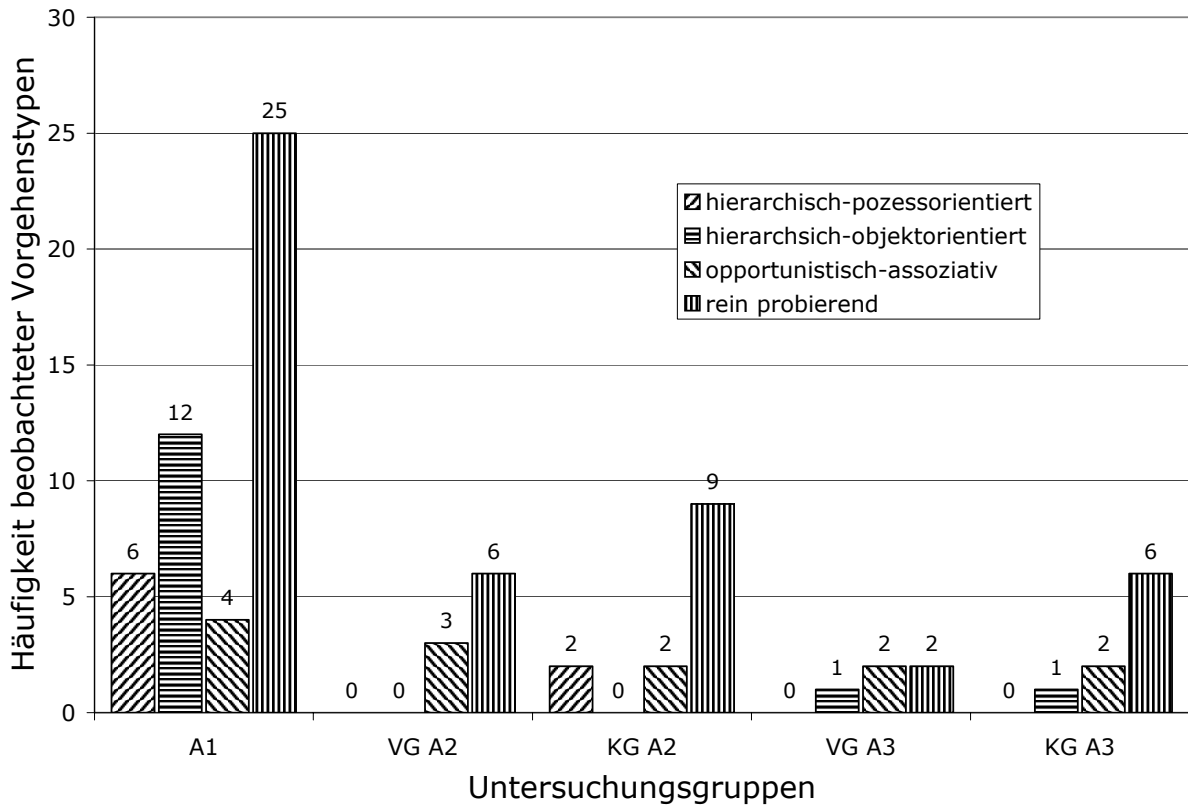


Abbildung 5-11: Gruppenspezifische Häufigkeit des Auftretens von Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase

Insgesamt kann jedoch ein signifikanter Einfluss der konstruktionsmethodischen Ausbildung auf die Ausprägung konkreter Vorgehenstypen nicht beobachtet werden. (Tabelle 5-22).

Tabelle 5-22: Gruppenspezifische Unterschiede in der Häufigkeit des Auftretens von Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase

Gruppenunterschiede Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase				
	Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
Verlaufsunterschiede der Versuchsgruppen	A1 (N=47) ↔ VG A2 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,067$	T 10%
	A1 (N=47) ↔ VG A3 (N=5)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,239$	n.s.
	VG A2 (N=9) ↔ VG A3 (N=5)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,545$	n.s.
Verlaufsunterschiede der Kontrollgruppen	A1 (N=47) ↔ KG A2 (N=13)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,147$	n.s.
	A1 (N=47) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,409$	n.s.
	KG A2 (N=13) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,545$	n.s.
Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen	VG A2 (N=9) ↔ KG A2 (N=13)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,419$	n.s.
	VG A3 (N=5) ↔ KG A3 (N=9)	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,776$	n.s.

Das beobachtete Auftreten hierarchisch-prozessorientierten Vorgehens in den beiden Untersuchungsgruppen, die nach dem Abschluss des Grundstudiums keinerlei weitere praktische Entwurfserfahrung sammeln konnten (Baseline A1 und KG A2), lässt sich – spekulativ – wiederum als Folge dieser mangelnden Erfahrung erklären, die bei einer

relativen Minderheit dazu führt, das Problem eher logisch-hierarchisch vom Abstrakten zum Konkreten zu zerlegen. Ein solches Vorgehen wird also offenbar von einer Untergruppe unerfahrener Anfänger – im Sinne einer in anderen Problemlöseprozessen erlernten kognitiven Basisstrategie – gewählt, um ein rein probierendes Vorgehen zu vermeiden.

Die Hypothesen für den Ausbildungseinfluss auf die Ausprägung der in Kapitel 3.4.3 definierten hypothetischen Vorgehensstypen in der Vorentwurfsphase können somit nicht bestätigt werden.

5.3 Einfluss des tatsächlich beobachteten Vorgehens auf die Qualität der Konstruktionsergebnisse

Die dritte Forschungsfrage nach dem Einfluss des tatsächlich beobachteten Vorgehens auf den Konstruktionserfolg ist im Zusammenhang dieser Arbeit die entscheidende: Ihre Beantwortung ist die wesentliche Basis für die Erarbeitung präskriptiver Modellvorstellungen und Handlungsempfehlungen. Wenn geklärt werden kann, welches Vorgehen im Sinne der Qualität von Ergebnissen von Entwicklungsprozessen den besten Erfolg verspricht, kann zusammen mit den oben dargelegten Erkenntnissen darüber, welche Ausbildung auf welche Weise handlungswirksam ist, ein umfassendes Konzept dafür dargelegt werden, wie diese erfolgreichen Vorgehensweisen in Lehre und Weiterbildung gezielt gefördert werden können.

Die weitere Datenanalyse basiert hier auf der Gesamtheit der N=83 auswertbaren Fälle ohne Berücksichtigung der Zugehörigkeit zu einem bestimmten Ausbildungsniveau.

5.3.1 Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte in der Konzeptphase

Zur Untersuchung des Vorgehenseinflusses auf die Lösungsgüte in der Konzeptphase stehen wiederum vor allem die Häufigkeiten von Phasenvisits und der *Methodikkennwert* zur Verfügung (vgl. Kapitel 5.2.1). Hier kann man zunächst untersuchen, ob es eine monotone Korrelation zwischen diesen Häufigkeiten und der erreichten Lösungsgüte gibt (Tabelle 5-23).

Tabelle 5-23: *Monotone Zusammenhänge zwischen Phasenvisits und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase*

Korrelation zw. Phasenvisits und Lösungsgüte in Konzeptphase			
Variable	Kendall-τ	Signifikanz³⁵	Beurteilung
Methodikwert	-0,033	$\alpha = 0,340$	n.s.
Information	-0,122	$\alpha = 0,086$	T 10%
Definition	-0,190	$\alpha = 0,012$	S 5%
Kreation	0,121	$\alpha = 0,066$	T 10%
sys. Teilschritte	0,102	$\alpha = 0,104$	n.s.
techn.-wirtschaftl. Kriterien	0,111	$\alpha = 0,086$	T 10%

Außer für die Teilphase *Definition* kann kein signifikanter monotoner Einfluss des konstruktionsmethodischen Vorgehens insgesamt (Methodikwert) und der Häufigkeit von Visits in Teilphasen des Konzipierens auf die Lösungsgüte beobachtet werden. In der Teilphase *Definition* gibt es zwar einen negativen Einfluss der Betonung dieser Phase auf die Lösungsgüte, allerdings ist dieser Einfluss mit $\tau = -0,190$ eher schwach. Im Streudiagramm sieht man, dass dieses eher als ein die Spreizung verringernder, d.h. auf mittlere Lösungsgüte nivellierender, Einfluss interpretiert werden kann (Abbildung 5-12). Dieser ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass diese Phase anfänglich vernachlässigt wird, aufgrund von erkannten Fehlern in späteren Phasen dafür aber umso häufiger aufgesucht werden muss. Dieses ist aufgrund fehlender Verlaufsdaten für die Versuche in der Konzeptphase hier jedoch nicht zu belegen.

³⁵ Aufgrund der gerichteten Hypothese, dass ein konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen folgendes Vorgehen zu besserer Lösungsgüte führt, werden hier einseitige Signifikanzen bestimmt.

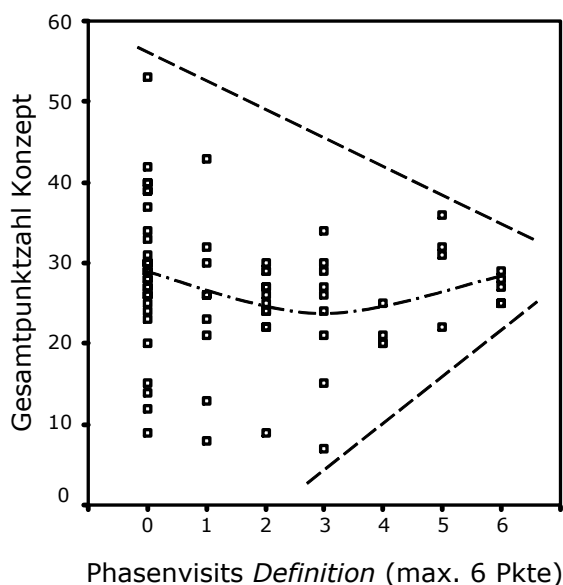


Abbildung 5-12: Streudiagramm für den Einfluss der Häufigkeit von Phasensits in der Teilphase „Definition“ auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase³⁶

Für die anderen lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens kann ein auf mittlere Lösungsgüte nivellierender Einfluss nicht beobachtet werden. Jedoch lässt sich für die globale Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen, gemessen am Methodikwert, ein solcher Einfluss vermuten (Abbildung 5-13).

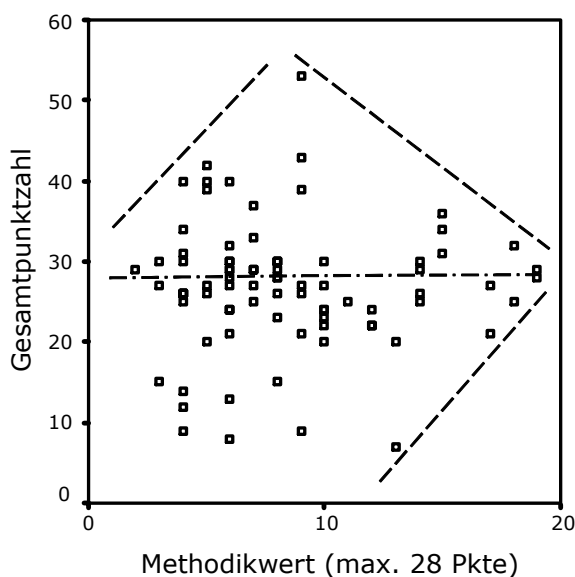


Abbildung 5-13: Streudiagramm für den Einfluss des „Methodikwerts“ auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

³⁶ Zur Hervorhebung von Haupttrends werden in Streudiagramme polynomische oder lineare Trendlinien eingefügt, je nachdem, welche den jeweiligen Trend besser verdeutlichen. Diese wurden auf der Basis von Mittelwerten exakt berechnet. Zusätzlich werden einhüllende Begrenzungen des Datensatzes angegeben, die qualitativ ermittelt wurden.

Für die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in der abschließenden Teilphase *Beurteilung und Entscheidung* tritt dieser nivellierende Einfluss sehr auffällig zu Tage (Abbildung 5-14).

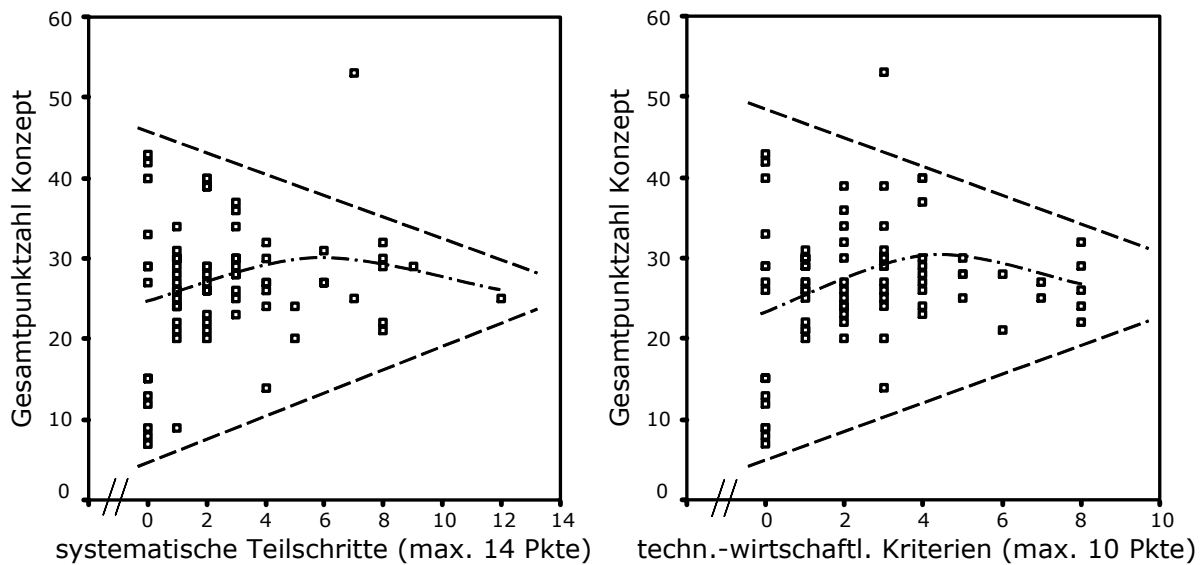


Abbildung 5-14: Streudiagramme für den Einfluss der Häufigkeit von Phasenvisits in der Teilphase „Beurteilung und Entscheidung“ auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Insgesamt lässt sich somit kein monotoner Zusammenhang zwischen der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen und der erzielten Lösungsgüte beobachten. Auffällig ist trotzdem, dass bei stärkerer Befolgung dieser Handlungsempfehlungen die Bandbreite erzielter Lösungsgüten deutlich abnimmt. Schlechte Lösungen treten dann – ebenso wie sehr gute – nicht mehr auf. Und auch eine schwache Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen – gemessen am Methodikwert – bringt keine exzellenten Lösungen, dafür aber schlechte hervor. Die größte Spreizung findet sich hier im mittleren Bereich des Methodikwertes. Um diese Effekte explorativ weiter zu untersuchen, werden sowohl die Häufigkeiten der Lösungsgüte als auch die Ausprägungen des Methodikwertes und die Häufigkeiten der Phasenvisits entlang der jeweiligen Quartile datengesteuert in

- „schwache“ (untere 25%), „mittlere“ (25...75%) und „sehr gute“ (obere 75%) Lösungsgüten,
- sowie „geringe“ (bis 25%), „mittlere“ (25...75%) und „umfassende“ (über 75%) Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen,

gruppiert, jeweils *relativ* gemessen an der tatsächlichen Verteilung in den Versuchen. Auf diese Weise werden je dreifach gestufte nominale Merkmalsausprägungen erzeugt, die zum einen Beurteilungsunsicherheiten der – auf qualitativen Schätzurteilen basierenden – Lösungsgütebeurteilung ausgleichen und zum anderen Häufigkeitstests unterzogen werden können.

Gruppiert man zunächst die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen auf diese Weise und untersucht die Häufigkeitsverteilungen der in den so gebildeten Gruppen erzielten Lösungsgüte, kann man den vermuteten nivellierenden Effekt einiger Komponenten des konstruktionsmethodischen Vorgehens überprüfen. Hierfür wird die medianbasierte Variante des Levené-Tests auf Homogenität der Varianz eingesetzt. Es werden Unterschiede zwischen den Gruppen, die konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen nur in geringem Umfang folgen (unterer Quartil) und denen, die dieses umfassend tun (oberer Quartil), ausgewertet (Tabelle 5-24)³⁷.

Tabelle 5-24: Varianzunterschiede der Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase in Abhängigkeit vom konstruktionsmethodischen Vorgehen

Varianzunterschiede der Lösungsgüte in der Konzeptphase					
	Methodeneinsatz	Varianz	Test	Signifikanz	Beurteilung
Methodikwert	gering	81,62	Levene-Test	$\alpha = 0,225$	n.s.
	umfassend	40,28			
Definition	gering	72,15	Levene-Test	$\alpha = 0,474$	n.s.
	umfassend	41,78			
syst. Teilschritte	gering	174,15	Levene-Test	$\alpha = 0,001^{**}$	S 1%
	umfassend	53,55			
techn.-wirtschaftl. Kriterien	gering	164,10	Levene-Test	$\alpha = 0,000^{**}$	S 1%
	umfassend	25,62			

Es ist zu erkennen, dass der vermutete nivellierende Effekt der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in den lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens – d.h. für die Teilphase *Definition* und für den globalen Methodikwert – nicht signifikant nachgewiesen werden kann. Für die abschließende Teilphase der Lösungsbeurteilung und Auswahlentscheidung dagegen ist ein signifikanter Vorgehenseinfluss überdeutlich.

Gruppiert man zusätzlich auch die Häufigkeitsverteilungen der Lösungsgüte auf die beschriebene Weise, kann der Vorgehenseinfluss weiter eingegrenzt werden. Für die globale Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen wird hier deutlicher als im Streudiagramm, dass sich die so gebildeten drei Vorgehensgruppen in den Häufigkeitsverteilungen der Lösungsgüte nicht signifikant unterscheiden (Abbildung 5-15).

³⁷ Die Untersuchungen beschränken sich hier auf diejenigen Variablen, für die die Streudiagramme Varianzunterschiede nahe legen.

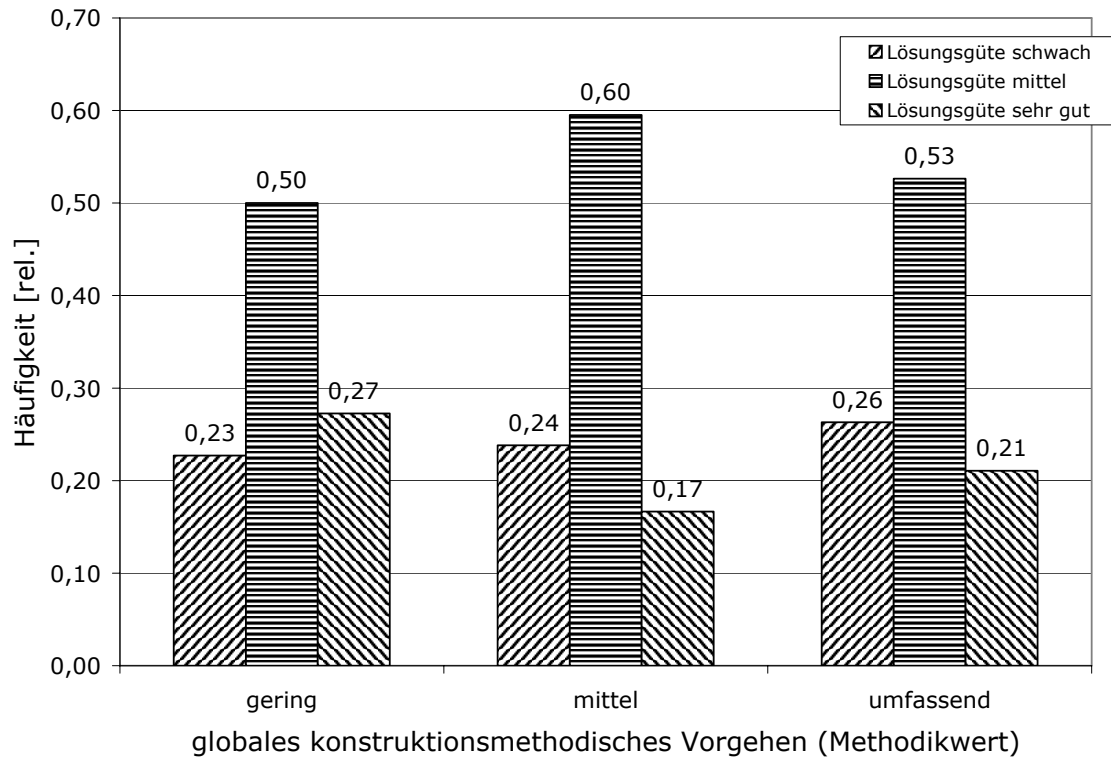


Abbildung 5-15: globales konstruktionsmethodisches Vorgehen und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Das gleiche gilt für die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in der Teilphase *Definition* (Abbildung 5-16).

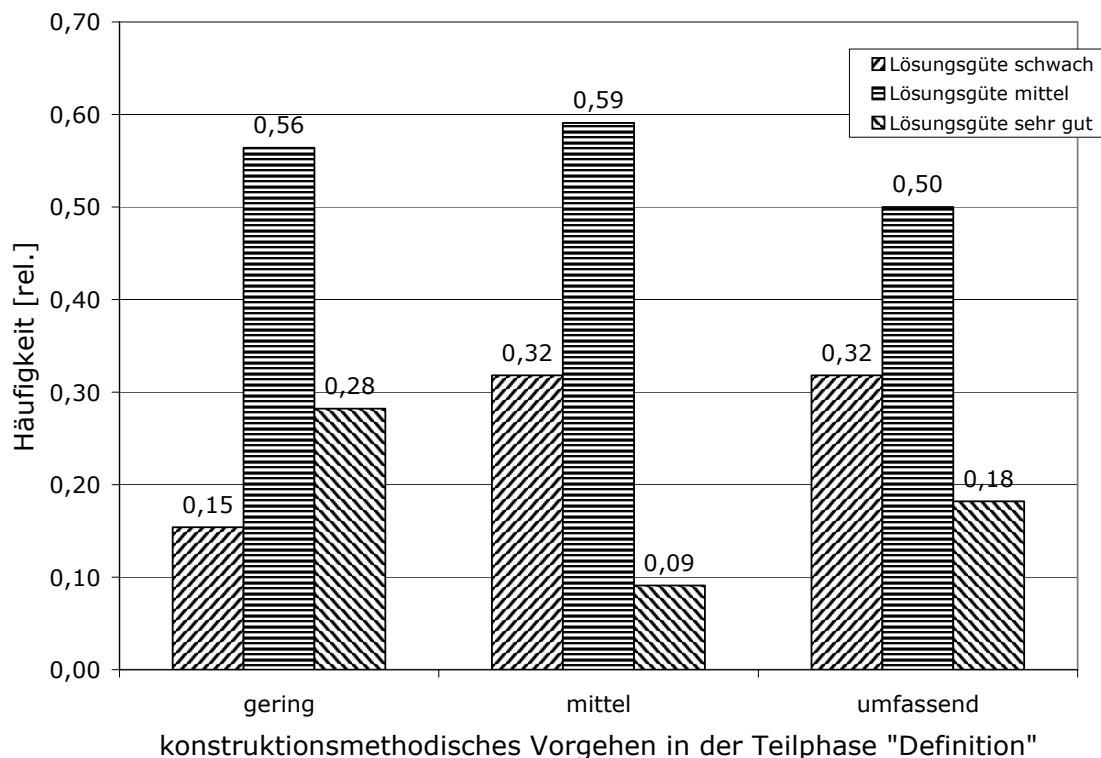


Abbildung 5-16: konstruktionsmethodisches Vorgehen in der Teilphase „Definition“ und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Erkennbar bleibt aber auch hier die Tendenz, dass die umfassende Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in der Teilphase *Definition* einen relativ größeren Anteil schwacher Lösung hervorbringt.

Bei den beiden Variablen des methodischen Vorgehens bei der Beurteilung von Lösungsvarianten und der Auswahlentscheidung bietet sich dagegen ein anderes Bild. Eine nur geringe Ausführung systematischer Teilschritte bei der Lösungsbeurteilung scheint hier neben der schon nachgewiesenen höheren Varianz der Verteilung auch einen höheren Anteil schwacher Lösungen nach sich zu ziehen (Abbildung 5-17).

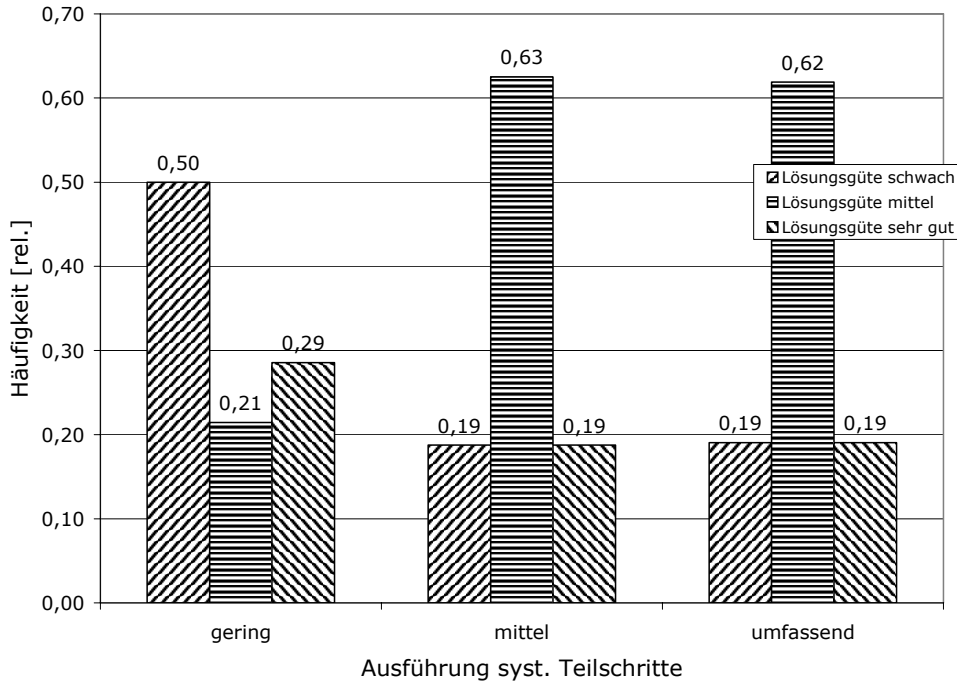


Abbildung 5-17: Ausführung systematischer Teilschritte bei der Beurteilung von Lösungsvarianten und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Dieser Effekt lässt sich auch für den Umfang der Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Kriterien bei der Lösungsbeurteilung beobachten (Abbildung 5-18).

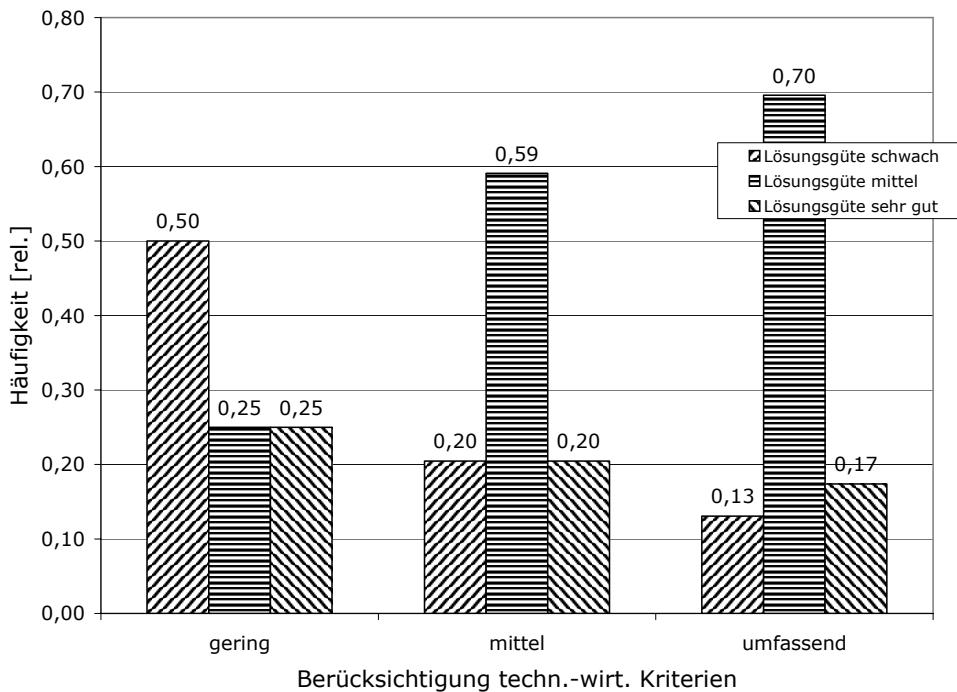


Abbildung 5-18: Berücksichtigung techn.-wirtschaftl. Kriterien bei der Beurteilung von Lösungsvarianten und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase

Für beide Variablen der Teilphase *Beurteilung und Entscheidung* wird dieser Unterschied – bei immerhin durchgängig mittlerer Effektstärke w – auch signifikant, während er für die lösungserzeugenden Teilphasen erwartungsgemäß nicht nachgewiesen werden kann (Tabelle 5-25).

Tabelle 5-25: *Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase auf Basis dichotomisierter Datensätze*

Vorgehenseinfluss auf Lösungsgüte in der Konzeptphase					
	Methodeneinsatz	Test	Signifikanz	w³⁸	Beurteilung
Methodikwert	über alle Gruppen	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,881$	-	n.s.
	gering ↔ mittel	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,596$	-	n.s.
	gering ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 1,000$	-	n.s.
	mittel ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,804$	-	n.s.
Teilphase Definition	über alle Gruppen	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,275$	-	n.s.
	gering ↔ mittel	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,127$	-	n.s.
	gering ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,352$	-	n.s.
	mittel ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,769$	-	n.s.
Ausführung syst. Teilschritte	über alle Gruppen	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,094$	0,309	n.s.
	gering ↔ mittel	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,016^*$	0,339	S 5%
	gering ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,060$	0,380	T 10%
	mittel ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 1,000$	-	n.s.
Berücksichtigung techn.-wirt. Kriterien	über alle Gruppen	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,050^*$	0,324	S 5%
	gering ↔ mittel	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,041^*$	0,312	S 5%
	gering ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,016^*$	0,423	S 5%
	mittel ↔ umfassend	ex. Fisher-Test	$\alpha = 0,762$	-	n.s.

Die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen während der eher lösungserzeugenden Phasen hat somit zunächst keinen Einfluss auf die Lösungsgüte und vermindert auch nur tendenziell die Varianz der Qualität der erzeugten Lösungen. Konstruktionsmethodisches Vorgehen während der Lösungsbeurteilung und Auswahlentscheidung hingegen erhöht die Qualität der erzeugten Lösungen und vermindert das Entwicklungsrisiko durch Nivellierung der Lösungsgüte auf ein mittleres Niveau signifikant.

Die Hypothesen zum Einfluss des tatsächlichen Vorgehens auf die Lösungsgüte in der Konzeptphase können somit nur zum Teil, in den bestätigten Teilen allerdings sehr deutlich, bestätigt werden.

³⁸ w = Kontingenzkoeffizient als Maß für die Effektstärke des Häufigkeitsverteilungsunterschieds.

5.3.1.1 Vorgehenseinfluss auf die prozedurale Lösungsgüte in der Konzeptphase

Da in der konstruktionsmethodischen Theorie und Ausbildung Methoden zum Beurteilen und Auswählen von Lösungen stark betont werden, ist die Frage von besonderem Interesse, ob die direkte Qualität des Ergebnisses eines Beurteilungsprozesses, die sich vor allem darin bemisst, ob ein Beurteilungsergebnis zutreffend ist, von der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen profitiert (zur Erläuterung vgl. Kapitel 4.4.1.1).

Hier kann man zunächst einen möglichen monotonen Zusammenhang zwischen Variablen des bei den Versuchspersonen bei der Beurteilung von Lösungskonzepten beobachteten Vorgehens und der Qualität der von ihnen vorgenommenen Lösungsgütebeurteilung selbst untersuchen. Die Untersuchung konzentriert sich auf zwei Bereiche:

- den Einfluss der globalen Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in den lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens („Methodikkennwert“) auf die Lösungsgüte der von den Versuchspersonen vorgenommenen Konzeptbewertung;
- den Einfluss der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen bei der Konzeptbewertung selbst auf die dabei erzielte Lösungsgüte.

Dabei kann als Maß des Konstruktionserfolgs in dieser Phase zum einen die insgesamt erreichte Zahl von Bewertungspunkten („Lösungsgüte Konzeptbewertung“) und zum anderen die direkte Qualität des Konzeptbewertungsergebnisses herangezogen werden, die als Indikator innerhalb dieser Lösungsgütekategorie mittels einer fünfwertigen Skala operationalisiert wurde (vgl. Kapitel 4.4.1.1, Abbildung 4-19, Kategorie „Bewertungsergebnis“).

Das globale konstruktionsmethodische Vorgehen bei der Lösungserzeugung scheint auf beide Lösungsgütemaße einen positiven Einfluss zu haben (Abbildung 5-19).

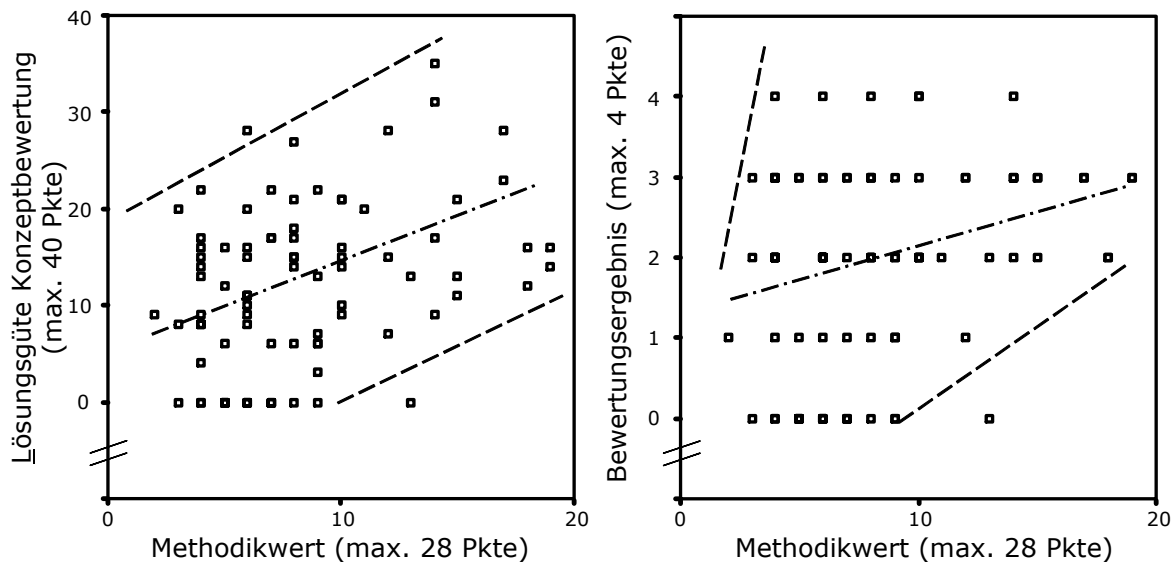


Abbildung 5-19: Einfluss des globalen konstruktionsmethodischen Vorgehens auf die prozedurale Lösungsgüte in der Konzeptphase und das Konzeptbewertungsergebnis

Da die beiden Vorgehensvariablen der Teilphase *Beurteilung und Entscheidung* für die Mehrheit der bei der Messung der prozeduralen Lösungsgüte in der Konzeptphase erreichbaren Bewertungspunkte verantwortlich zeichnen (vgl. Kapitel 4.4.1.1), korrelieren diese Variablen zwangsläufig positiv mit der Lösungsgüte in dieser Kategorie. Deshalb wird hier nur der mögliche monotone Zusammenhang zwischen diesen beiden Vorgehensvariablen und der im Bewertungsbogen gemessenen direkten Lösungsgüte des Bewertungsergebnisses untersucht (Abbildung 5-20).

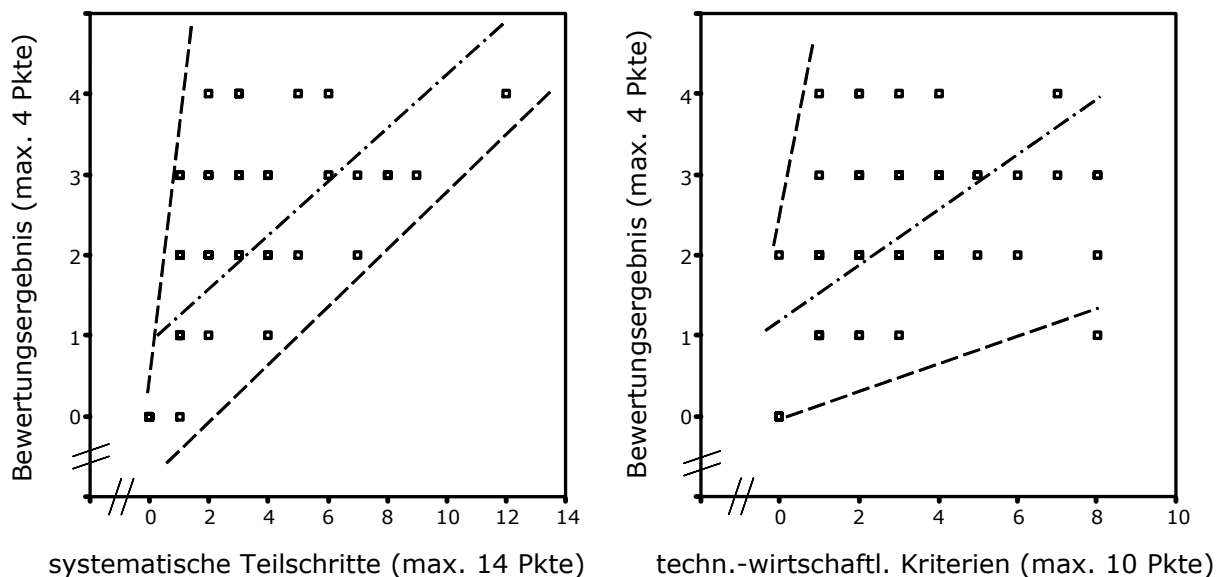


Abbildung 5-20: Einfluss der Ausführung systematischer Teilschritte des Bewertens und der Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Kriterien auf das Bewertungsergebnis

Auch hier ist eine positive Tendenz schon deutlich zu erkennen. Die Untersuchung der Korrelationen weist diese monotonen Zusammenhänge als deutlich signifikant nach (Tabelle 5-26).

Tabelle 5-26: *Monotone Zusammenhänge zwischen Vorgehen und prozeduraler Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Konzeptphase*

Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte bei der Konzeptbewertung				
Variable	Einfluss auf	Kendall- τ	Signifikanz ³⁹	Beurteilung
Methodikwert ⁴⁰	Lösungsgüte Konzeptbewertung	0,227	$\alpha = 0,002^{**}$	S 1%
	Bewertungsergebnis	0,196	$\alpha = 0,011^*$	S 5%.
syst. Teilschritte	Bewertungsergebnis	0,654	$\alpha = 0,000^{**}$	S 1%
techn.-wirt. Kriterien	Bewertungsergebnis	0,562	$\alpha = 0,000^{**}$	S 1%

Die globale Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen beim Konzipieren (repräsentiert durch den Methodikwert) übt einen deutlich signifikanten Einfluss auf die prozedurale Lösungsgüte insgesamt, aber auch auf die Qualität des Bewertungsergebnisses selbst aus, bei allerdings eher geringer Effektstärke. Ersteres ist nahe liegend, da man vermuten kann, dass ein methodischeres Vorgehen bei der Lösungserzeugung auch eine höhere Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen bei der Lösungsbewertung und –auswahl nach sich zieht. Der zweite Zusammenhang weist darauf aufbauend dann darauf hin, dass ein insgesamt konstruktionsmethodisches Vorgehen zutreffendere Bewertungsergebnisse erzeugt.

Diese Tendenz wird durch die im Effekt sehr starke und hochsignifikante Korrelation zwischen den Vorgehensvariablen der Teilphase Beurteilung/ Entscheidung und der Qualität der Bewertungsergebnisse eindrucksvoll untermauert.

Für die prozedurale Lösungsgüte in der Konzeptphase kann somit ein positiver Einfluss konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen deutlich nachgewiesen werden.

5.3.2 Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte in der frühen Entwurfsphase

Wie schon bei der Untersuchung des Vorgehenseinflusses in der Konzeptphase, werden auch hier zunächst mögliche monotone Zusammenhänge zwischen der Häufigkeit von Phasenvisits in den Teilphasen des Entwerfens und der Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase untersucht. Die beiden Teilphasen *Aufgabe klären* und *Konzipieren* erfordern bei den vorliegenden Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase, bei denen im wesentlichen vorherige Aufgabenklärungs- und Konzeptaktivitäten nachvollzogen werden müssen, erwartungsgemäß nur geringen Aufwand. Deshalb werden diese für die weitere Auswertung zur Teilphase *Aufgabenklärung und Konzept* zusammengefasst.⁴¹

³⁹ Aufgrund der gerichteten Hypothese, dass ein konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen folgendes Vorgehen zu besserer Lösungsgüte führt, werden hier einseitige Signifikanzen bestimmt.

⁴⁰ Signifikante Korrelationen konnten auch für alle Teilphasen des Konzipierens nachgewiesen werden. Da es sich dabei um Untergruppen des Methodikwertes handelt, werden die Ergebnisse hier zur Vermeidung redundanter Information jedoch nicht wiedergegeben.

⁴¹ Die Ergebnisse wurden für die beiden Teilphase „Aufgabe klären“ und „Konzipieren“ auch jeweils einzeln überprüft und lieferten in allen Fällen die gleichen Ergebnisse.

Tabelle 5-27: *Monotone Zusammenhänge zwischen Phasenvisits und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase*

Korrelation zw. Phasenvisits und Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase			
Variable	Kendall-τ	Signifikanz	Beurteilung
Aufgabenklärung und Konzept	0,023	$\alpha = 0,393$	n.s.
Grobgestalten	-0,060	$\alpha = 0,444$	n.s.
Feingestalten	-0,021	$\alpha = 0,779$	n.s.
Vervollständigen und Kontrollieren	0,065	$\alpha = 0,402$	n.s.

Ein monotoner Zusammenhang zwischen der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen und der erzielten Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase kann somit nicht beobachtet werden.

Betrachtet man allerdings die Verteilung der Lösungsgüte über die Vorgehensvariablen, so erkennt man nichtmonotone Tendenzen, die trotzdem einen Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte vermuten lassen, wenn man auch hier wieder Lösungsgütegruppen bildet, die sich an den Quartilen⁴² der erreichten Bewertungspunktzahl orientieren (Tabelle 5-28).

⁴² Diese relativen Lagemaße liegen dann – zufälligerweise – genau bei 50% und 75% der absolut (30 bzw. 45 Bewertungspunkte) erreichten Bewertungspunkte. Lösungsgüten unter 40% (24 Bewertungspunkte) wurden nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.1.3).

Tabelle 5-28: Gruppenspezifische Häufigkeitsverteilungen der relativen Phasenvisits bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase nach Lösungsgütegruppen

rel. Phasenvisits und Lösungsgüte Vorentwurfsphase				
schwache Lösungsgüte (≥ 40 ... 50%, N=17)				
	Aufgabenklärung und Konzept	Grobgestalten	Feingestalten	Vervollständigen und Kontrollieren
Mittelwert	3,76	25,88	33,82	36,59
Std.-fehler	1,06	2,51	1,65	3,25
Median	2	27	35	39
Std.-abw.	4,37	10,34	6,81	13,40
Minimum	0	10	23	11
Maximum	12	48	44	59
gute Lösungsgüte (≥ 50 ... 75%, N=44)				
	Aufgabenklärung und Konzept	Grobgestalten	Feingestalten	Vervollständigen und Kontrollieren
Mittelwert	0,84	16,82	39,70	42,84
Std.-fehler	,033	1,30	1,58	2,02
Median	0	15,50	38	46,50
Std.-abw.	2,17	8,59	10,51	13,40
Minimum	0	0	24	6
Maximum	12	38	67	69
sehr gute Lösungsgüte (≥ 75 ... 100%, N=22)				
	Aufgabenklärung und Konzept	Grobgestalten	Feingestalten	Vervollständigen und Kontrollieren
Mittelwert	2,09	22,73	33,27	41,91
Std.-fehler	0,57	2,19	1,35	2,76
Median	0	24,50	35,50	41
Std.-abw.	2,69	10,25	6,34	12,96
Minimum	0	8	22	17
Maximum	10	43	41	61

Es ist eine Haupttendenz zu erkennen, die nahe legt, dass schwach beurteilte (< 50% Bewertungspunkte) und sehr gut beurteilte (> 75% Bewertungspunkte) Versuchspersonen vergleichbare Vorgehensstrategien verfolgen, die sich von der Vorgehensstrategie der mittleren Gruppe (50 ... 75% Bewertungspunkte) unterscheiden.

Für die Teilphase *Aufgabenklärung und Konzept* (Abbildung 5-21) erkennt man einen tendenziell höheren Zeitanteil für Versuchspersonen, die schwache oder sehr gute Lösungen erzielen, gegenüber denjenigen, die eher eine mittlere Lösungsgüte erreichen.

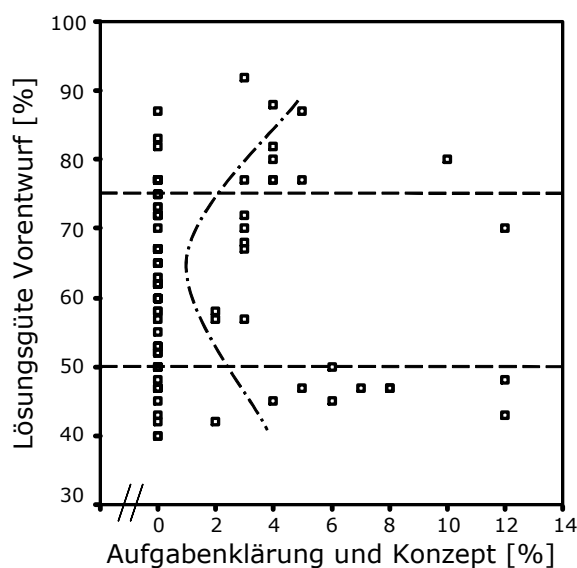


Abbildung 5-21: Vorgehen bei Aufgabenklärung und Konzept (Angaben in % der insgesamt beobachteten Aktivitäten) und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Ähnliche Tendenzen erkennt man auch für die Teilphasen *Grobgestalten* und *Feingestalten*, allerdings unter jeweils entgegengesetzten Vorzeichen (Abbildung 5-22).

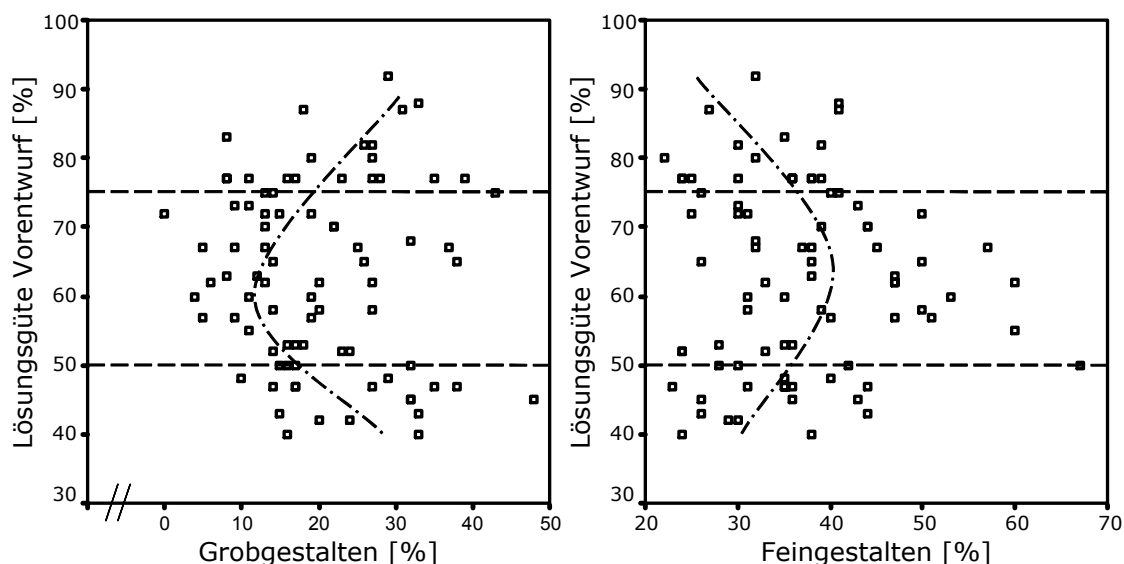


Abbildung 5-22: Vorgehen beim Grob- und Feingestalten (Angaben in % der insgesamt beobachteten Aktivitäten) und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Für die abschließende Teilphase *Vervollständigen und Kontrollieren* ist der Trend weniger ausgeprägt. Insbesondere scheinen sich hier mittlere und sehr gute Versuchspersonen kaum zu unterscheiden (Abbildung 5-23).

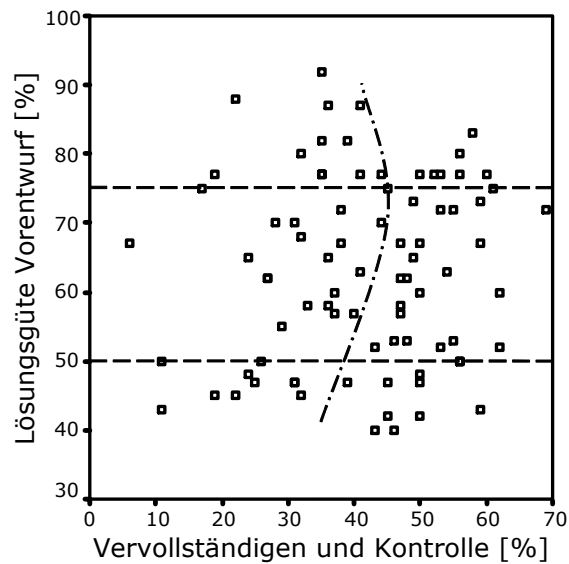


Abbildung 5-23: Vorgehen beim Vervollständigen und Kontrollieren (Angaben in % der insgesamt beobachteten Aktivitäten) und Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase

Die Tendenz zu gleichen Schwerpunkten im Vorgehen bei schwachen und sehr guten Versuchspersonen sind vor allem in den frühen Phasen des Entwerfens signifikant nachweisbar (Tabelle 5-29).

Tabelle 5-29: Vorgehenseinfluss auf die Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase auf Basis dichotomisierter Datensätze

Vorgehenseinfluss auf Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase				
Teilphase	Lösungsgüte	Test	Signifikanz	Beurteilung
Aufgabenklärung und Konzept	über alle Gruppen	Mediantest	$\alpha = 0,022^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,005^{**}$	S 1%
	schwach (N=17) ↔ mittel (N=44)	Mediantest	$\alpha = 0,013^*$	S 5%
		H-Test	$\alpha = 0,004^{**}$	S 1%
	schwach (N=17) ↔ sehr gut (N=22)	U-Test	$\alpha = 0,252$	n.s.
	mittel (N=44) ↔ sehr gut (N=22)	Mediantest	$\alpha = 0,034^*$	S 5%
H-Test		$\alpha = 0,016^*$	S 5%	
Grobgestalten	über alle Gruppen	Mediantest	$\alpha = 0,108$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,004^{**}$	S 1%
	schwach (N=17) ↔ mittel (N=44)	Mediantest	$\alpha = 0,082$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,002^{**}$	S 1%
	schwach (N=17) ↔ sehr gut (N=22)	U-Test	$\alpha = 0,328$	n.s.
	mittel (N=44) ↔ sehr gut (N=22)	Mediantest	$\alpha = 0,069$	T 10%
H-Test		$\alpha = 0,025^*$	S 5%	
Feingestalten	über alle Gruppen	Mediantest	$\alpha = 0,092$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,033^*$	S 5%
	schwach (N=17) ↔ mittel (N=44)	Mediantest	$\alpha = 0,066$	T 10%
		H-Test	$\alpha = 0,058$	T 10%
	schwach (N=17) ↔ sehr gut (N=22)	U-Test	$\alpha = 0,955$	n.s.
	mittel (N=44) ↔ sehr gut (N=22)	Mediantest	$\alpha = 0,140$	n.s.
H-Test		$\alpha = 0,020^*$	S 5%	
Vervollständigen und Kontrollieren	über alle Gruppen	Mediantest	$\alpha = 0,588$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,248$	n.s.
	schwach (N=17) ↔ mittel (N=44)	Mediantest	$\alpha = 0,393$	n.s.
		H-Test	$\alpha = 0,080$	T 10%
	schwach (N=17) ↔ sehr gut (N=22)	U-Test	$\alpha = 0,239$	n.s.
	mittel (N=44) ↔ sehr gut (N=22)	Mediantest	$\alpha = 0,339$	n.s.
H-Test		$\alpha = 0,679$	n.s.	

Die Ergebnisse zeigen deutliche Vorgehensunterschiede der sehr gut und der schwach beurteilten Versuchspersonen gegenüber der mittleren Lösungsgütekategorie (vgl. auch Abbildung 5-24). Beide Gruppen verweilen länger in den frühen Phasen der Aufgabenklärung und Planung und investieren mehr Zeit in die vorläufige Lösungsdefinition während der Phase der Grobgestaltung.

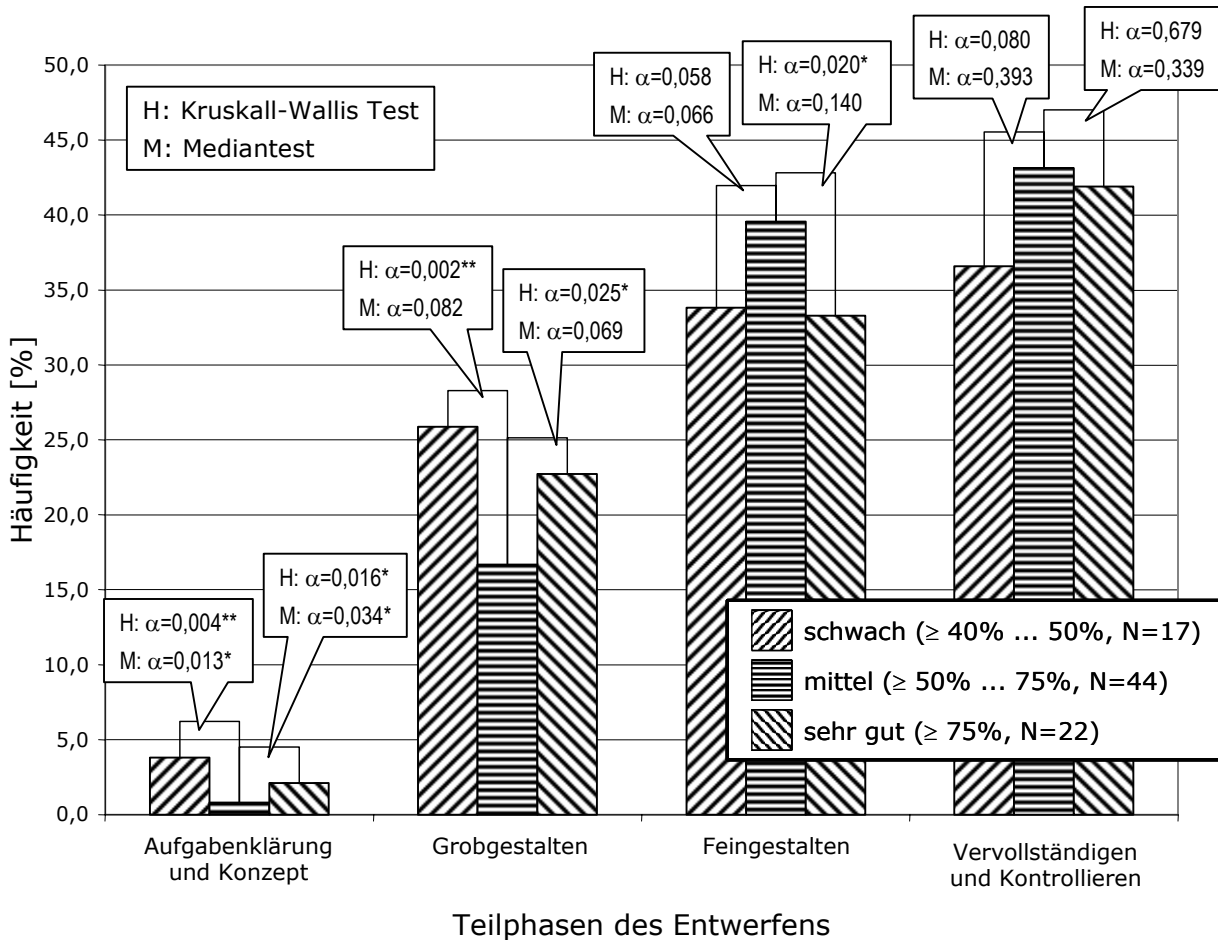


Abbildung 5-24: Mittelwerte der relativen Häufigkeiten von Phasensits bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase nach Lösungsgütegruppen

Es bestätigt sich somit, dass sehr gute Lösungen – ganz im Sinne konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen – tatsächlich auf einer intensiven Analyse der Aufgabenstellung, einer guten Vorgehensplanung und der Erstellung eines Grobkonzeptes vor der abschließenden Detailgestaltung basieren. Zum anderen weist es darauf hin, dass schlechte Konstrukteure offenbar größeren Aufwand treiben müssen, um die Aufgabenstellung überhaupt nachvollziehen zu können. Möglich ist auch, dass sich ein „unangemessen methodisches Vorgehen“ (FRICKE 1993, S. 103f.), das sich entscheidungsvermeidend und wenig zielführend auf eine eher formale Aufgabenklärung und Planung stützt, zu schlechteren Lösungen führt. Eine eher opportunistische Strategie der schnellen Konkretisierung – erkennbar an geringeren zeitlichen Anteilen der frühen Phasen und verbunden mit einem dann eher korrigierenden Vorgehen auf dem Konkretisierungsniveau der Feingestaltung – führt dabei offenbar in vielen Fällen zu immerhin mittleren Lösungsgüten.

Die Untersuchung des Einflusses der aus der deskriptiven Konstruktionsforschung abgeleiteten hypothetischen Vorgehenstypen (3.4.3) liefert hier weitergehende Erkenntnisse. Die erzielte Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase unterscheidet sich je nach Vorgehenstypus z.T. deutlich (Tabelle 5-30).

Tabelle 5-30: Häufigkeitsverteilungen der absoluten Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase nach Vorgehenstypen

Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase (max. 60 Bewertungspunkte)				
	hierarchisch-prozessorientiert (N = 8)	hierarchisch-objektorientiert (N = 14)	opportunistisch-assoziativ (N = 13)	rein probierend (N = 48)
Mittelwert	31,88	39,07	40,85	37,50
Std.-fehler	2,52	1,69	2,28	1,19
Median	29,50	39,50	42	37
Std.-abw.	7,12	6,33	8,21	8,29
Minimum	26	28	27	24
Maximum	48	46	53	55

Man erkennt deutlich, dass Versuchspersonen, die ein hierarchisch-prozessorientiertes Vorgehen zeigen, offenbar schlechtere Lösungsgüten erzielen, als diejenigen Versuchspersonen, die andere Strategien wählen (Abbildung 5-25).

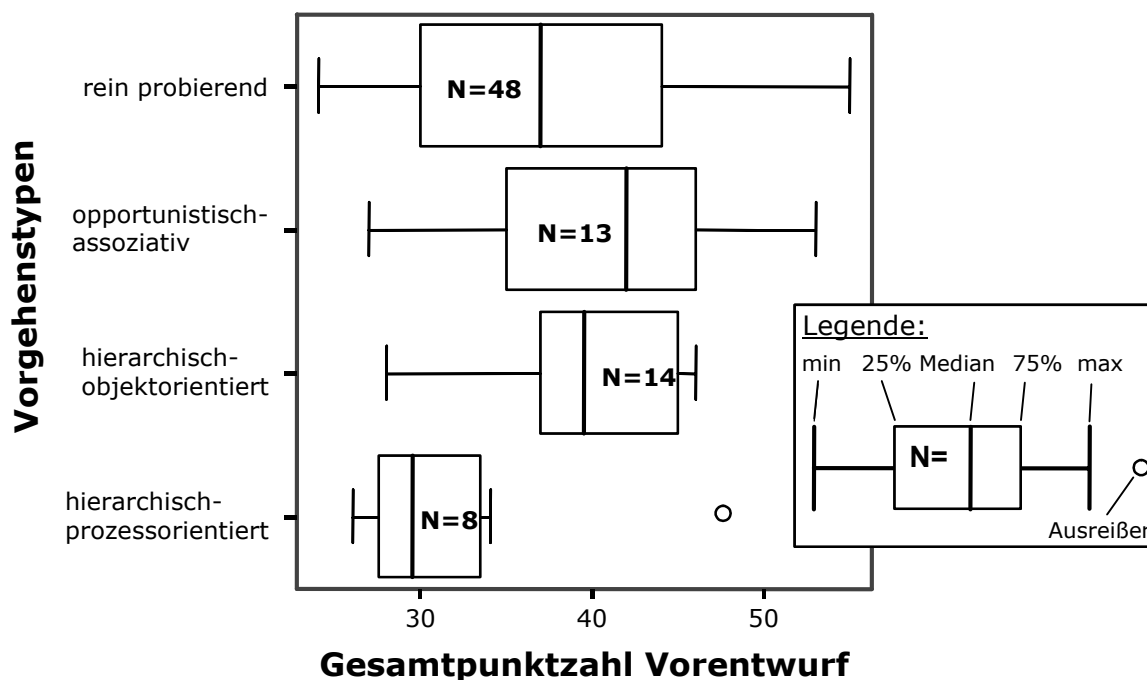


Abbildung 5-25: Boxplots der Lösungsgüte bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase nach Vorgehenstypen

Bei genauerer Betrachtung der Einzelunterschiede fällt auf, dass sich hier bei der Untersuchung von Lösungsgüteunterschieden über alle Gruppen ein signifikanter Haupteffekt zeigt, der offenbar vor allem auf die deutliche Unterlegenheit des hierarchisch-prozessorientierten Vorgehens gegenüber allen anderen Vorgehenstypen zurückzuführen ist, die sich jeweils im Konstruktionserfolg gegeneinander nicht signifikant unterscheiden (Tabelle 5-31).

Tabelle 5-31: Lösungsgüteunterschiede in Abhängigkeit vom Vorgehenstypus

Lösungsgüteunterschiede nach Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase			
Gruppenvergleich	Test	Signifikanz	Beurteilung
über alle Gruppen (N=83)	Mediantest	$\alpha = 0,044^*$	S 5%
	H-Test	$\alpha = 0,084$	T 10%
HP (N=8) ↔ HO (N=14)	U-Test	$\alpha = 0,029^*$	S 5%
HP (N=8) ↔ OA (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,025^*$	S 5%
HP (N=8) ↔ RP (N=48)	Mediantest	$\alpha = 0,025^*$	S 5%
	H-Test	$\alpha = 0,066$	T 10%
HO (N=14) ↔ OA (N=13)	U-Test	$\alpha = 0,465$	n.s.
HO (N=14) ↔ RP (N=48)	Mediantest	$\alpha = 0,197$	n.s.
	H-Test	$\alpha = 0,448$	n.s.
OA (N=13) ↔ RP (N=48)	Mediantest	$\alpha = 0,174$	n.s.
	H-Test	$\alpha = 0,204$	n.s.

Unter den nicht hierarchisch-prozessorientierten Vorgehenstypen schneiden dabei offenbar das opportunistisch-assoziative Vorgehen und das hierarchisch-objektorientierte am besten ab. Selbst die rein probierende Gruppe liefert noch im Mittel bessere Lösungsgüten, als die streng konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen folgende hierarchisch-prozessorientierte Gruppe (Abbildung 5-26).

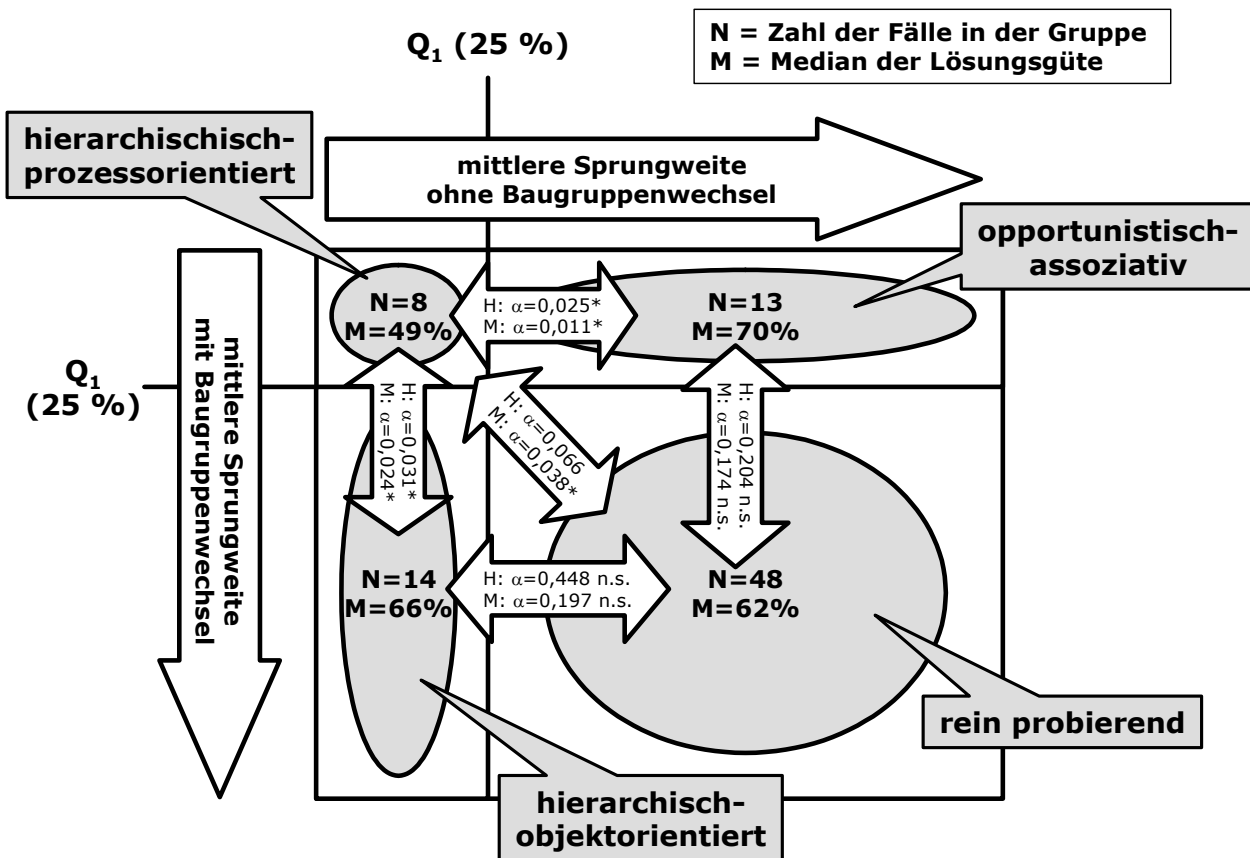


Abbildung 5-26: Vorgehenstypen und Lösungsgüte

Betrachtet man neben der Signifikanz der Lösungsgüteunterschiede zusätzlich als Maß der empirischen Relevanz die Effektstärken mittels Kennziffern für das Maß der Überlegenheit der anderen Vorgehenstypen gegenüber der hierarchisch-prozessorientierten Gruppe (vgl. Kapitel 4.5.1), so wird deutlich, dass sich auch innerhalb der anderen Gruppen wesentliche Unterschiede im Hinblick auf die Stärke der Überlegenheit ergeben (Tabelle 5-32, nur für signifikante Effekte berechnet).

Tabelle 5-32: *Effektstärken der Lösungsgüteunterschiede bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen aus der Vorentwurfsphase nach Vorgehenstypen*

Effektstärken der Lösungsgüteunterschiede nach Vorgehenstypen in der Vorentwurfsphase						
Gruppenvergleich	rR50	f50	OR50	rR75	f75	OR75
HP (N=8) ↔ HO (N=14)	3,50	0,71	6,0	1,23	0,18	2,80
HP (N=8) ↔ OA (N=13)	3,25	0,69	5,5	1,63	0,38	6,00
HP (N=8) ↔ RP (N=48)	2,67	0,63	4,3	1,14	0,12	2,08

So ist das relative Risiko (rR50), eine schwache Lösungsgüte unter 50% der erreichbaren Bewertungspunktzahl zu erzielen, bei einem hierarchisch-prozessorientierten Vorgehen (HP) gegenüber allen anderen Vorgehenstypen ca. dreimal höher – mit einer Tendenz zur Überlegenheit hierarchisch-objektorientierten (HO) und opportunistisch-assoziativen (OA) Vorgehens, bei einer um von 60 bis 70% reduzierten Wahrscheinlichkeit (f50), das 50%-Niveau der Lösungsgüte zu verfehlen. Damit sind diese Vorgehenstypen dem hierarchisch-prozessorientierten Vorgehen in diesem Bereich vier- bis sechsfach überlegen („Odd Ratio“, OR50).

Bei der Wahrscheinlichkeit, sehr gute Lösungen zu erzielen, wird deutlich, dass das opportunistisch-assoziative Vorgehen innerhalb der erfolgreicherer Strategien den größten Konstruktionserfolg in der frühen Entwurfsphase verspricht. Während hierarchisch-objektorientierte und rein probierende Vorgehenstypen hier bezogen auf das relative Risiko (rR75), die 75% Marke der Lösungsgüte zu verpassen, gegenüber dem hierarchisch-prozessorientierten Vorgehen nur leicht besser abschneiden, so ist dieses Maß für das opportunistisch-assoziative Vorgehen, bei dem dieses Risiko um ca. 40% vermindert ist, deutlich günstiger. Im Ergebnis ist das opportunistisch-assoziative Vorgehen dem hierarchisch-prozessorientierten in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit, sehr gute Lösungen zu erzielen, sechsfach überlegen, während die anderen beiden Alternativen hier „nur“ zwei- bis dreimal so gut abschneiden (OR75).⁴³

Interessant ist hier außerdem, dass die signifikante Überlegenheit der Gruppe derjenigen Versuchspersonen, die einen rein probierenden (RP) Vorgehensstil aufweisen, gegenüber der hierarchisch-prozessorientierten Gruppe erst verschwindet, wenn man sie auf den oberen Quartil der mittleren Sprungweiten mit und ohne Baugruppenwechsel

⁴³ Vergleicht man den Konstruktionserfolg der verschiedenen Vorgehenstypen nicht entlang der absoluten Grenze von 50% bzw. 75% der erreichbaren Lösungsgüte sondern jeweils relativ gegeneinander, misst also das relative Risiko, mit einem Vorgehenstypen allgemein schlechter abzuschneiden, als mit einem anderen, so werden die Überlegenheitswerte gegenüber dem hierarchisch-prozessorientierten Vorgehen sogar deutlich zweistellig.

einengt, also erst dann, wenn das rein probierende Vorgehen in ein tatsächliches „muddling through“ mit großen Vor- und Rücksprüngen umschlägt.

Die Hypothesen über den Einfluss der in Kapitel 3.4.3 definierten Vorgehenstypen auf die Lösungsgüte in der Vorentwurfsphase können somit bestätigt werden. Darüber hinaus wurde die Überlegenheit objektorientierter und opportunistisch-assoziativer Problemdekomposition und Vorgehenssteuerung gegenüber der strikten Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen sehr deutlich nachgewiesen.

5.4 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Untersuchung des Ausbildungseinflusses auf die Lösungsgüte ergab unterschiedliche Ergebnisse. In der Konzeptphase kann ein positiver Einfluss frischer, rein theoretisch vermittelter konstruktionsmethodischer Ausbildung auf die Lösungsgüte nicht nachgewiesen werden. Dies entspricht auch der Erwartung, dass erlerntes Wissen erst nach vertiefter Anwendung so internalisiert und prozeduralisiert wird, dass es positiv handlungswirksam werden kann. Allerdings zeigt auch die vertiefte konstruktionsmethodische Ausbildung nicht die erwarteten positiven Effekte, so dass hier entweder noch keine ausreichende Internalisierung erfolgt ist oder die vermittelten Handlungsempfehlungen insgesamt die in der Konzeptphase geforderten Operationen nicht geeignet unterstützen.

In der frühen Entwurfsphase können dagegen die erwarteten Effekte beobachtet werden. Die frische konstruktionsmethodische Ausbildung führt nicht zu besseren Ergebnissen, die Vertiefung in einem sechsmonatigen Konstruktionsprojekt auf dem Ausbildungsniveau A3 erhöht dagegen den Konstruktionserfolg in dieser Kategorie.

Bei der Untersuchung des Ausbildungseinflusses auf das tatsächlich realisierte Vorgehen konnte ein deutlicher Einfluss in der Konzeptphase beobachtet werden. Hier wird wie erwartet eine frische, rein theoretische konstruktionsmethodische Ausbildung zunächst nicht handlungswirksam, während sich auf dem Ausbildungsniveau A3 die vertiefte konstruktionsmethodische Ausbildung deutlich im beobachteten Vorgehen niederschlägt. Die so ausgebildete Versuchsgruppe führt insgesamt und auch für alle lösungserzeugenden Teilphasen des Konzipierens deutlich mehr Basisoperationen des konstruktionsmethodischen Vorgehens aus als alle anderen Untersuchungsgruppen. Für die Konzeptphase konnten die Hypothesen in diesem Bereich somit deutlich bestätigt werden.

Für die die Konzeptphase abschließende Teilphase der Lösungsbeurteilung und Auswahlentscheidung kann dagegen zwar eine allgemeine Tendenz zu systematischerem Vorgehen und umfassenderer Beurteilung von Lösungsvarianten über die drei Ausbildungsniveaus hinweg beobachtet werden, jedoch ohne dass sich hierbei ein signifikanter Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung nachweisen lässt. Eher ist hier von einer allgemein gewachsenen Handlungskompetenz mit zunehmendem Ausbildungsfortschritt auszugehen.

Auch in der Vorentwurfsphase kann ein systematischer und signifikanter Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung auf das tatsächliche Vorgehen nicht beobachtet werden. Lediglich schwache Hinweise lassen sich finden, dass ein frühes Anfängerniveau eine hierarchisch-prozessorientierte Vorgehensweise als eine Art kognitiver Basisstrategie eher hervorbringt (nämlich in der Baseline A1 und der Kontrollgruppe auf dem Ausbildungsniveau A2) als andere Vorgehensweisen, die offenbar auf einem *allgemein höheren* Ausbildungsniveau eher eine wissens- bzw. erfahrungsbasierte Problemdekomposition erlauben.

Erklärbar sind die starken Unterschiede im Ausbildungseinfluss auf die Konzept- und frühe Entwurfsphase hier aber auch curricular: Die Lehrveranstaltungen, die die Ausbildungsniveaus A2 und A3 charakterisieren, fokussieren in ihrer prozessorientiert-methodischen Anleitung stark auf die frühe Konzeptphase, während sie für die Entwurfsphase stärker produktorientiert auf Gestaltungsprinzipien, -regeln und -richtlinien abzielen.

Die Untersuchung des Einflusses des tatsächlichen Vorgehens auf die erreichte Lösungsgüte ergab z.T. erstaunliche Resultate. In der Konzeptphase kann ein Einfluss der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in den lösungserzeugenden Teilphasen *Information*, *Definition* und *Kreation* – bis auf eine schwache Tendenz zur Verminderung des Entwicklungsrisikos durch Nivellierung der Arbeitsergebnisse auf mittleres Lösungsgüteniveau – zunächst nicht nachgewiesen werden. Sehr deutlich ist dagegen ein Zusammenhang zwischen der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in der abschließenden Teilphase *Beurteilung und Entscheidung* und der Qualität der erzeugten Lösungskonzepte. Ganz offensichtlich führt die Ausführung systematischer Teilschritte und die systematische Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Kriterien bei der Lösungsbeurteilung zu deutlich besseren Konstruktionslösungen in dieser Phase. Zudem erhöht die Befolgung dieser Handlungsempfehlungen auch die Qualität der Konzeptbeurteilungen selbst. Dieser in der konstruktionsmethodischen Ausbildung zentrale Ausbildungsinhalt ist somit als hochwirksam für die direkte *und* die prozedurale Lösungsgüte zu betrachten.

Für die frühe Entwurfsphase wird deutlich, dass eine strikte Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen zu signifikant schlechteren Ergebnissen im Vergleich zu allen anderen Vorgehensweisen führt, sofern ein Mindestniveau an fachlicher Kompetenz vorausgesetzt werden kann. Die erfolgreiche Bearbeitung nichttrivialer Konstruktionsaufträge aus der Vorentwurfsphase erfordert zur Komplexitätsreduktion eine globale Ablaufsteuerung, die auf einer Dekomposition der Problemstellung basiert, die ganz offensichtlich erfolgreich und effektiv vor allem

- *opportunistisch-assoziativ*, d.h. erfahrungsbasiert und auf der Basis verfügbaren Wissens entlang offenkundig schnell lösbarer Teilprobleme oder
- *hierarchisch-objektorientiert*, d.h. entlang der vorab zu analysierenden Baustruktur des zu entwerfenden Systems

durchgeführt werden kann. Zur lokalen Ablaufsteuerung sind dagegen sequentielle Vorgehenspläne, die als fertige Vorgehensschemata abgerufen werden können und zu *hierarchischen Episoden* innerhalb des global opportunistisch oder objektorientiert organisierten Vorgehens führen, eine erfolgreiche Strategie. Es kann aufgrund theoretischer Vorüberlegungen und empirischer Befunde (vgl. Kapitel 3.1) vermutet werden, dass diese Strategien auf Grund der mit ihnen verbundenen effektiven Komplexitätsreduktion den Anforderungen der menschlichen Problemlöser unter dem Gesichtspunkt der kognitiven Ökonomie weit eher entgegenkommen als eine systematische und vollständige Problemdekomposition und Vorgehensplanung entlang abstrakter Prozessmerkmale.

6 Synthese: Konzipieren und Entwerfen als Lernprozess

Die Ergebnisse der Laborstudie bestätigen frühere empirische Befunde, die regelmäßig Abweichungen von präskriptiven konstruktionsmethodischen Vorgehensempfehlungen als typisch für das Expertenhandeln in Entwicklung und Konstruktion nachweisen konnten. Auch wenn in dieser Arbeit das Entwurfshandeln von Studierenden untersucht wurde, so konnte doch deutlich bestätigt werden, dass schon auf diesem frühen Niveau sich entwickelnder Expertenkompetenz eine strikte Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen kein Erfolg versprechender Ansatz ist.

Die Befunde in dieser Arbeit gehen über bisherige Ergebnisse deskriptiver Konstruktionsforschung einen Schritt hinaus. Während bisher von vielen Autoren iterative Vorgehensweisen und eine nichthierarchische Ablaufsteuerung in realen Prozessen als *typisch* identifiziert wurden, konnte in dieser Arbeit auf der Basis großer Fallzahlen nachgewiesen werden, dass diese darüber hinaus auch *erfolgreicher* sind. Zudem konnten verschiedene Differenzierungen eines nichthierarchischen Vorgehens definiert und empirisch validiert werden, die es erlauben, spezifische Vorgehenstypen als Grundlage deskriptiver und präskriptiver Modellvorstellungen des Entwurfshandelns eindeutig abzugrenzen.

Viele Autoren empfehlen einen flexibleren Einsatz der Konstruktionsmethodik und schlagen z.B. ein „flexibel-methodisches“ (FRICKE 1993) oder „flexibel-lösungsorientiertes“ (RÜCKERT 1997) Vorgehen vor. Auch die präskriptive Konstruktionsforschung hat die Notwendigkeit der Flexibilisierung ihrer Vorgehensmodelle anerkannt. Während in der Richtlinie VDI 2221 (1986) nur in einem Satz auf die Möglichkeit des iterativen „Zurückgehens auf vorangegangene Abschnitte“ hingewiesen wird (VDI 2221 (1986), S. 9), umfasst diese Thematik in der Ausgabe von 1993 schon mehrere Absätze und iteratives Vorgehen wird dabei als unumgänglich angesehen. „Auch aus den Erkenntnissen der Denkpsychologie ist ableitbar, dass es keine streng linearen oder einsinnigen Ablaufpläne beim Problemlösen bzw. Konstruieren gibt, sondern dass nur iteratives Vorgehen, das sich flexibel dem zu lösenden Problem, dem Kenntnis- und Erfahrungsstand, dem Lösungsfortschritt und den persönlichen Fähigkeiten des Bearbeiters anpasst, zum Erfolg führt.“ (VDI 2221 (1993), S. 5). Gleichwohl handelt es sich dabei um eine eher retrospektive Identifikation der richtigen Strategie, bei der Abweichungen von strikt hierarchischen Vorgehensplänen im Nachhinein als problemadäquat und „richtig“ erkannt werden. Konkrete Kriterien oder Strategien, wie ein flexibel-methodisches bzw. flexibel-lösungsorientiertes Vorgehen im Entwicklungsprozess jeweils vorausdenkend und vorausplanend in eine erfolgreiche globale Ablaufsteuerung umgesetzt werden kann, werden nicht angeboten. Die Ergebnisse der dieser Arbeit zugrunde liegenden Laborstudie geben hier konkrete Hinweise, wie diese Lücke zu schließen wäre, da Korrelationen zwischen einzelnen strategischen Vorgehensmerkmalen und dem Konstruktionserfolg hergestellt werden konnten.

Konzepte opportunistisch-assoziativer Handlungsregulierung spielen bei diesen Überlegungen eine wichtige Rolle. Diese bieten das vielversprechendste Potenzial für die de-

skriptive Modellierung erfolgreicher schöpferischer Entwurfsprozesse und für die Formulierung neuer präskriptiver Handlungsempfehlungen. Dabei gibt es jedoch auch spezifische Risiken, die beachtet werden müssen. Potenziale und Probleme dieses Ansatzes werden deshalb in Kapitel 6.1 genauer betrachtet.

In einer zusammenfassenden Synthese wird ein Vorgehensmodell für die Konzept- und frühe Entwurfsphase vorgestellt, das besser als bisherige Modellvorstellungen der präskriptiven Konstruktionsmethodik tatsächliches erfolgreiches Entwurfshandeln abbildet und gleichzeitig als Grundlage für eine adäquate Steuerung des individuellen Entwurfshandelns in den frühen Phasen der Produktentwicklung dienen kann (Kapitel 6.2).

Abschließend werden einige Schlussfolgerungen für die Konstruktionsausbildung gezogen (Kapitel 6.3).

6.1 Opportunistische Handlungssteuerung: Potenziale und Grenzen

Die deskriptive Konstruktionsforschung und auch die vorliegende Laborstudie haben deutlich gezeigt, dass eine global opportunistisch-assoziative Handlungssteuerung bei der Bearbeitung schöpferischer Entwurfsprobleme überaus erfolgreich ist. Sie ist kennzeichnend für das erfolgreiche Vorgehen von Experten und – vielleicht überraschend – ebenso für das Vorgehen relativer Konstruktionsanfänger, wie sie von den in der Laborstudie untersuchten Studierenden repräsentiert werden.

Opportunistische Vorgehensstrategien können jedoch auch problematisch sein. Dieses wird deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass dieser Vorgehenstyp in der vorliegenden Studie zwar im Mittel die höchste Lösungsgüte hervorbrachte, jedoch gleichzeitig auch eine sehr große Bandbreite – die man auch als Konstruktionsrisiko interpretieren kann – von schwachen bis hervorragenden Lösungen aufwies (vgl. Abbildung 5-25, S. 213). Bei den anderen Vorgehenstypen sinkt mit zunehmendem „Hierarchisierungsgrad“ jeweils die Bandbreite – und damit das Risiko – der Lösungsgüte. Bei strikter Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen schließlich ist die Lösungsgüte zwar insgesamt mäßig, die Bandbreite ist jedoch deutlich geringer. Es drängt sich die Hypothese auf, dass eine opportunistische Handlungssteuerung für sehr gute wie für schwache Konstrukteure *gleichermaßen* charakteristisch ist. Diese Hypothese wird gestützt von dem Befund, dass es tatsächlich in mehreren Vorgehensmerkmalen hohe Gemeinsamkeiten zwischen den Gruppen mit Lösungsgüten aus dem unteren und dem oberen Quartil der Lösungsgüteverteilung gibt, bei gleichzeitig abweichenden Ausprägungen dieser Merkmale für die mittlere Lösungsgütegruppe (vgl. Kapitel 5.3.2, insbesondere Abbildung 5-24, S. 212). Bei genauer Betrachtung kann man also feststellen, dass sehr gute Konstrukteure in ihrem Vorgehen flexibel – in den in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Ausprägungen – von hierarchisch-sequentiellen Vorgehensmodellen abweichen, dass die Umkehrung dieser Aussage jedoch nicht gilt: Opportunistische Handlungssteuerung führt nicht in jedem Falle zu einem guten Ergebnis.

DÖRNER 1989 liefert hierfür eine Erklärung. In einer Untersuchung, in der Versuchspersonen in der Rolle des fiktiven Bürgermeisters für das „Wohlergehen“ der Einwohner der

Stadt Lohhausen sorgen sollten (vgl. auch DÖRNER ET AL. 1983) konnte er beobachten, dass schlechte Problemlöser auf der Basis einer mangelhaften Zieldekomposition zu einer besonderen Form opportunistischer Handlungssteuerung übergangen. „Sie führen keine Dekomposition des Komplexziels durch! Sie machen sich nicht klar, dass ‚Wohlergehen‘ ein Komplexbegriff ist, der viele verschiedene Komponenten und ihre Bezüge zusammenfasst. Sie nehmen das Ziel ‚Wohlergehen der Einwohner‘ und beginnen zu handeln. Besser gesagt: sie wursteln los. Die Nichtaufteilung eines Komplexzieles in Teilziele aber führt fast notwendigerweise zu einem Verhalten, welches man ‚Reparaturdienstverhalten‘ nennen könnte. Da die ‚Bürgermeister‘ über eine klare Vorstellung dessen, was mit ‚Wohlergehen‘ eigentlich gemeint ist, nicht verfügen, wird nach Missständen *gesucht*. Und die Beseitigung irgendeines gefundenen Missstandes wird zum aktuellen Ziel.“ (DÖRNER 1989, S. 88, Hervorhebung im Original) In manchen Konstruktions- und Entwicklungsprozessen, aber auch im Problemlöseverhalten von Studierenden⁴⁴, kann man das beschriebene Verhalten beobachten. Es ist Ausdruck einer kognitiven Notfallreaktion unter äußerem (Zeit-)Druck und einer objektiven oder subjektiv empfundenen Überforderung gegenüber der Problemstellung. Dabei steht anstelle einer sorgfältigen Zielanalyse und einer Prioritäten setzenden Identifikation und Definition von Hauptproblemen und -anforderungen eine opportunistische Konzentration auf – fast beliebige – Ziele und Probleme anhand unscharfer Auffälligkeitskriterien im Vordergrund. Sehr oft ist dabei die Verfügbarkeit über Lösungsansätze oder Methoden handlungsleitend. „Man löst nicht die Probleme, die man lösen soll, sondern die, die man lösen kann.“ (DÖRNER 1989, S.90)

Was unterscheidet diese Form „falscher“ und zum Misserfolg verurteilter opportunistischer Handlungssteuerung von einer „richtigen“ und erfolgreichen? Es sind vor allem zwei Punkte:

- Erfolgreiche opportunistische Handlungssteuerung erfordert *Erfahrung*.

Erfolgreiche opportunistische Handlungssteuerung basiert auf Handlungs- und Beurteilungssicherheit und vollzieht sich in zwei elementaren Schritten. Zunächst müssen in einer Problemsituation verschiedene Handlungsalternativen, die einen potenziellen Problemlösungsbeitrag leisten können, überhaupt erkannt werden. Hierzu braucht es vor allem (Erfahrungs-)Wissen. Zum Zweiten müssen die erkannten Handlungsoptionen beurteilt und eine geeignete ausgewählt werden. Hierfür bedarf es neben Wissen auch einer ausgeprägten Analyse- und Beurteilungskompetenz, die ebenfalls eng mit Erfahrung verbunden ist. Dieses besondere Expertenwissen und –können wird vor allem in erfahrungsgeliteten Lernprozessen erworben (vgl. Kapitel 2.3.3). Je schwächer der Bezug eines Problems zum individuellen Erfahrungsbereich, desto größer ist die Gefahr, dass opportunistische Vorgehensstrategien scheitern (vgl. hier auch GUINDON 1990, die zum gleichen Ergebnis kommt).

⁴⁴ Dies gilt vor allem für Prüfungssituationen, in denen dieser Effekt regelmäßig zum Scheitern führt.

- Erfolgreiche opportunistische Handlungssteuerung bezieht sich nicht auf die *Handlungsziele*, sondern auf die *Handlungsoptionen*.

Erfolgreiche Konstruktions- und Entwicklungsprozesse weisen zwar in der Regel anfangs nur eine vorläufige Ziel- und Problemanalyse auf, das heißt aber nicht, dass diese nicht gründlich zu sein brauchte. „Für jeden, der in einem komplexen, dynamischen System handelt, ist es notwendig, sich zumindest vorläufige Vorstellungen über die Teilziele, die er anstreben möchte, zu machen. Denn das gibt ihm Klarheit darüber, was er wann zu tun hat.“ (DÖRNER 1989, S. 96) Die Vorläufigkeit der initialen Problem- und Zieldekomposition verweist hier vor allem darauf, dass diese fortlaufend konkretisiert, über den gesamten Prozess überprüft und an neue Erkenntnisse, die während der fortschreitenden Lösungskonkretisierung gewonnen werden, angepasst werden müssen. Was bei der Auswahl von Handlungsoptionen aus mehreren Alternativen kognitiv äußerst effizient und sehr erfolgreich sein kann, führt bei der Übertragung auf die Auswahl von (Teil-)Zielen und (Teil-)Problemen zum Scheitern, oder – mit Dörners Worten – zum „Ad-hocismus“ (Abbildung 6-1).

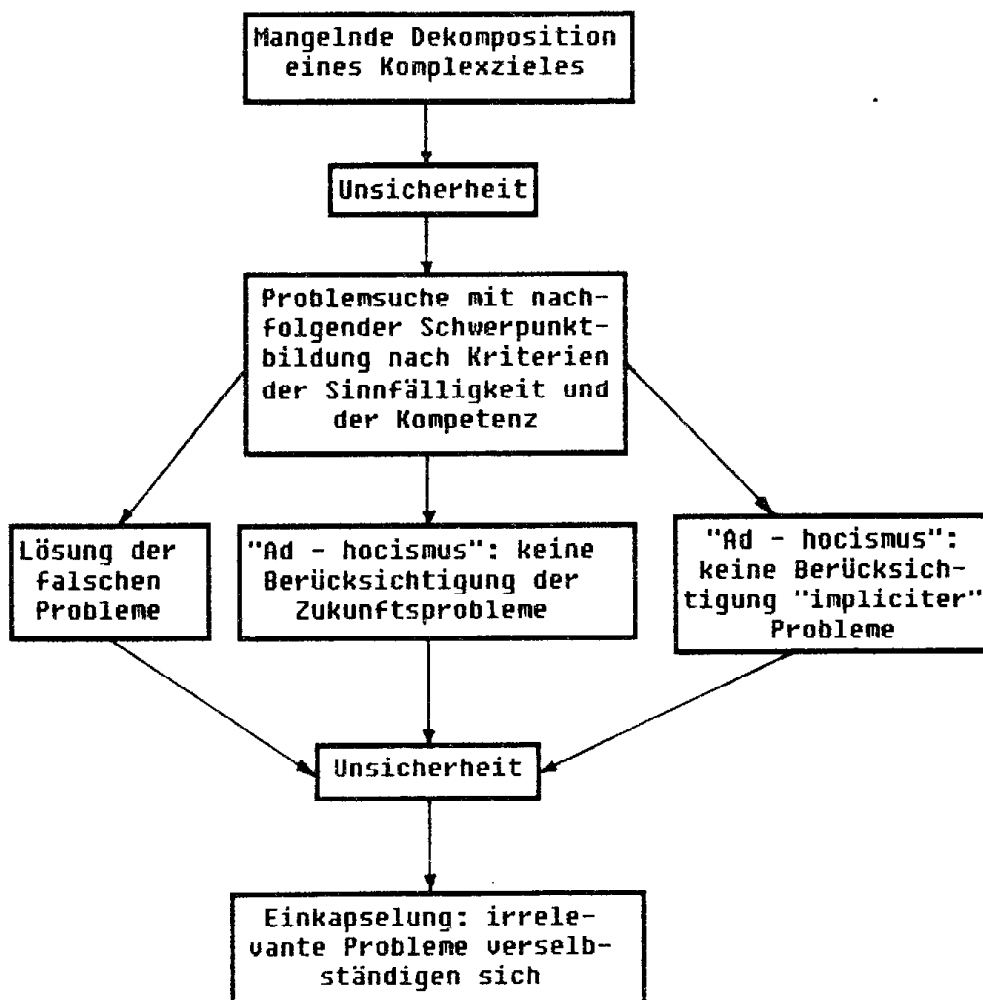


Abbildung 6-1: Folgen mangelnder Zielkonkretisierung (DÖRNER 1989, S. 94)

Zusammenfassend kann man also festhalten, dass eine opportunistische Handlungssteuerung ein hohes Erfolgspotenzial hat, aber auch völlig in die Irre führen kann. We-

sentlich für erfolgreiche opportunistische Handlungssteuerung ist Handlungssicherheit, die vor allem in der Beurteilungssicherheit bei der Auswahl von Handlungsoptionen besteht. Diese gründet sich vor allem auf Erfahrung und eine gründliche Problem- und Zielanalyse. So muss bei der Wahl der „richtigen“ Strategie – zwischen opportunistischer und „methodischer“ Handlungssteuerung – immer auch eine Abwägung zwischen (kognitivem) Aufwand und Risikominimierung vorgenommen werden. Steht Erfahrung als Ressource für Handlungssicherheit nicht oder nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung, kann diese Sicherheit am ehesten aus der Sicherheit eines systematischen Prozesses generiert werden. Bei mangelnder Erfahrung ist ein deshalb ein hierarchisch-prozessorientiertes Vorgehen – d.h. die strikte Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen – trotz des damit verbundenen erhöhten kognitiven Aufwands im Zweifelsfall die risikoärmere Strategie.

6.2 Konzipieren und Entwerfen als zielgerichteter Lernprozess: Eine Re-Interpretation der Konzeptphase

Ein Vorgehensmodell, das – deskriptiv – das tatsächliche Vorgehen in der Entwicklungs- und Konstruktionspraxis abbildet und gleichzeitig – präskriptiv – handlungsleitende Empfehlungen für ein erfolgreiches Vorgehen geben soll, muss mindestens den iterativen Charakter solcher Prozesse als *konstituierendes Element*, nicht als Abweichung von einer idealen Norm enthalten. Darüber hinaus sollte ein solches Vorgehensmodell die in Kapitel 3.3 identifizierten weiteren Hauptmerkmale des Entwurfshandelns berücksichtigen, d.h.

- über den gesamten Prozessverlauf eine schrittweise Problem- und Zielklärung bzw. –konkretisierung auf Basis einer gründlichen – dabei anfänglich nur vorläufigen – Aufgabenanalyse und Problemdekomposition vorsehen;
- eine auf (Erfahrungs-)Wissen basierende, kognitiv aufwandsarme globale Handlungssteuerung erlauben, bei der in einer konkreten Handlungssituation potenziell Erfolg versprechende Vorgehensoptionen opportunistisch genutzt werden können;
- eine auf früher – im neuen Vorgehensmodell dann eben nicht „vorgreifender“ – Konkretisierung basierende korrigierende Lösungserzeugung und –variation zulassen;
- den multimodalen Wechsel zwischen verschiedenen Arten der – internen wie externen – Problem-, Ziel-, und Lösungsrepräsentation unterstützen;
- flexibel an unterschiedliche organisationale Randbedingungen, individuelle Personenmerkmale sowie die dynamische Veränderung von Anforderungen, Zielen und Randbedingungen anpassbar sein, ohne beliebig zu werden;
- vor dem Hintergrund des grundsätzlichen Zielkonflikts zwischen optimaler technischer Lösung auf der einen sowie vertretbarem wirtschaftlichem und zeitlichem Aufwand auf der anderen Seite, eine Fokussierung auf zufrieden stellende Lösungen zulassen.

Ein solches Vorgehen trägt alle Merkmale eines erfahrungsgeleiteten Lernprozesses, wie er in dem Modell von KOLB 1984 beschrieben wird (vgl. Kapitel 2.3.3). Die Re-Interpretation des schöpferischen Entwickelns und Konstruierens als einen zielgerichteten, erfahrungsgeleiteten Lernprozess, bei dem stufenweise auf jeweils höherem Lern- bzw. Wissensniveau eine Fehleranalyse und -korrektur vorgenommen wird, ist deshalb Grundlage für ein Vorgehensmodell in der Konzeptphase, das diese Anforderungen erfüllt (Abbildung 6-2).

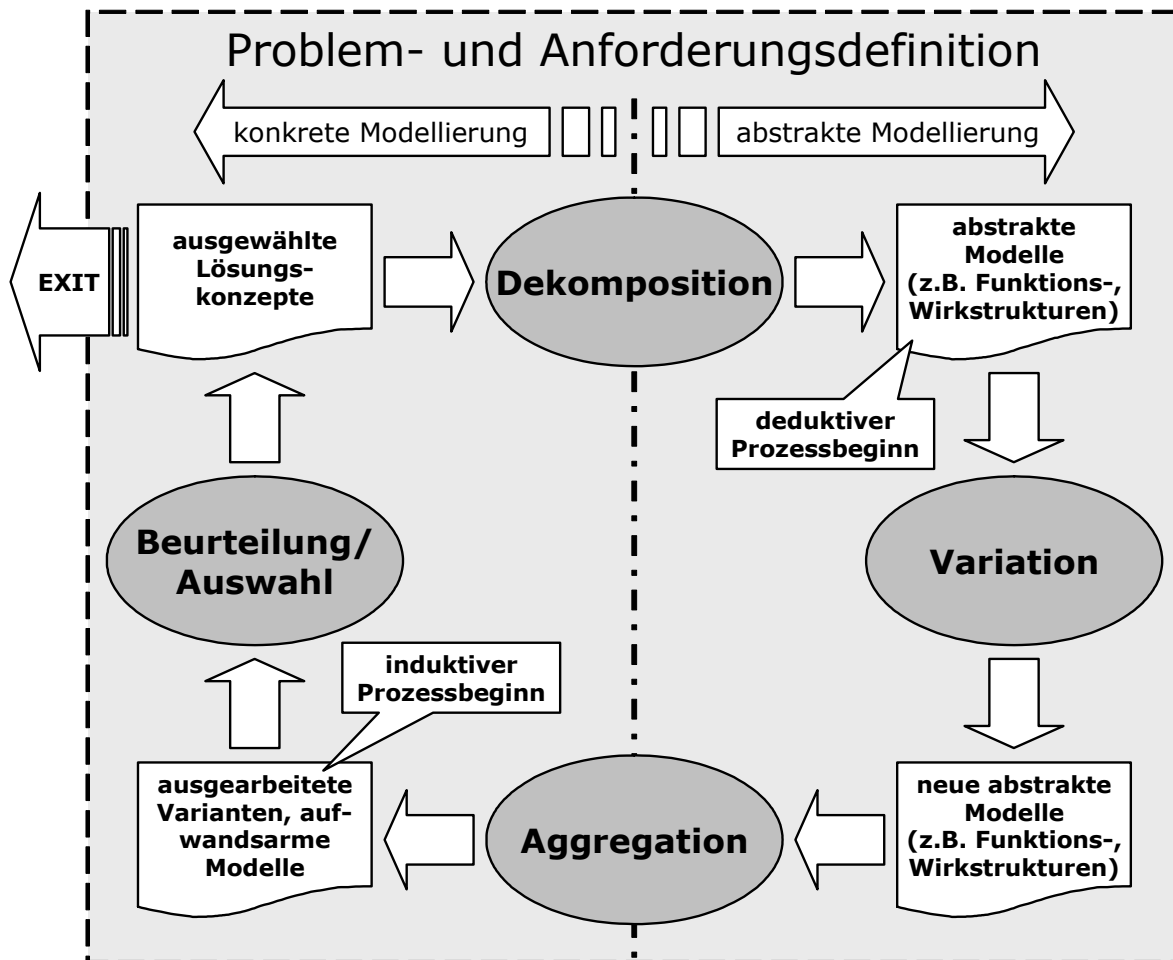


Abbildung 6-2: Konzipieren als erfahrungsgeleiteter Lernprozess

Dieses Vorgehensmodell bildet die kognitive Handlungssteuerung ab, wie sie bei der erfolgreichen Bearbeitung nichttrivialer Entwurfsprobleme beobachtet werden kann. Auf der Grundlage einer – zunächst vorläufigen – Problem- und Anforderungsdefinition werden übergeordnete Handlungsziele gebildet, die für den gesamten Prozess global handlungsleitend sind. Alle lokalen Aktivitäten werden aus diesen Zielen abgeleitet und an diesen gespiegelt. Gleichzeitig wirken im Prozessverlauf gewonnene neue Erkenntnisse auf die Problem- und Anforderungsformulierung – und damit auf die Handlungsziele – im Sinne einer schrittweisen Überprüfung und Konkretisierung zurück. Anforderungen und Ziele sind somit nicht das statische Ergebnis einer initialen Problemklärungsphase sondern – vergleichbar mit einer kontinuierlichen Kostenverfolgung in Modellen des Target Costing – ein zentrales übergeordnetes Steuerungsinstrument des Konstruktionsprozesses.

Als wesentlicher Unterschied zu bisherigen präskriptiven Vorgehensmodellen, die z.T. auch schon Iterationen „erlaubten“, wird in diesem Modell kein Voranschreiten vom Abstrakten zum Konkreten vorgeschrieben. Als Ausdruck unterschiedlicher Problemmerkmale, Randbedingungen und Vorgehensstrategien ist ein Einstieg in den Prozess an verschiedenen Startpunkten und auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus möglich. Bei Neuentwicklungen kann entweder – konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen folgend – ein *deduktiver* Prozessbeginn gewählt werden, indem z.B. zunächst auf abstrakter Ebene aus der Problemformulierung Funktionen und Wirkprinzipien abgeleitet und zu entsprechenden Strukturen kombiniert werden, die Basis einer weitergehenden *Variation* und anschließenden *Aggregation* zu einer oder mehreren konkreten Lösungsvariante(n) sind. Dieser Schritt umfasst sowohl die Verfeinerung der Modellierung durch Angabe geometrischer und stofflicher Merkmale als auch die Integration einzelner Lösungskomponenten zu (Teil-)Lösungsvarianten. *Beurteilung und Auswahl* erfolgen auf der Ebene konkreter Modellierung, z.B. anhand von Skizzen oder aufwandsarmen Modellen. Die so erzeugten konkreten Lösungen sind wiederum Ausgangspunkt einer *Dekomposition* und Überführung in eine abstraktere Modellierung⁴⁵, so dass der Zyklus – jetzt auf höherem Wissensstand – erneut durchlaufen werden kann, bis eine zufrieden stellende Lösung gefunden ist und der Prozess abgebrochen werden kann.

Abweichend von bisherigen konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen kann jedoch auch ein *induktiver* Prozessbeginn gewählt werden, der – einer opportunistischen Handlungssteuerung entsprechend – aufbauend auf schneller Konkretisierung einer oder mehrerer Erfolg versprechender (Teil-)Lösungen diese zunächst auf dem konkreten Modellierungsniveau von Skizzen oder aufwandsarmen Modellen einer Beurteilung und Auswahl unterzieht. Dabei kann im Falle einfacher Entwurfsprobleme direkt eine zufrieden stellende Lösung identifiziert und der Prozess abgebrochen werden. Ist dies nicht der Fall, muss der weitere Prozess ausgehend von diesem Punkt so lange in der oben beschriebenen Weise durchlaufen werden, bis eine zufrieden stellende Lösung gefunden ist. Die Entscheidung darüber, ob und wie oft der Prozess durchlaufen werden muss, hängt von der Beurteilungssicherheit am Ende des Beurteilungs- und Auswahl-schrittes ab. Diese wiederum basiert maßgeblich auf der objektiven Qualität der Problem- und Zielklärung und auf der subjektiven Problem- und Lösungseinsicht – und damit der Erfahrung – der Entwickler und Konstrukteure (vgl. Kapitel 6.1).

Bei Anpassungs- und Variantenkonstruktionen erfolgt der Einstieg in den Prozess ebenfalls induktiv auf Basis einer vorliegenden, konkreten Ausgangslösung, so dass dieses Modell – abweichend von bisherigen Vorgehensmodellen der Konstruktionsmethodik – auch für diese Kategorien von Entwurfsproblemen anwendbar ist.

Korrigierende wie generierende Lösungserzeugung und –variation sind in diesem Vorgehensmodell jeweils möglich, da der Prozess gleichermaßen für nur eine Lösungsvari-

⁴⁵ Die Dekomposition einer konkreten Lösungsvariante kann dabei durchaus zunächst auf dem konkreten Modellierungsniveau erfolgen, z.B. durch Gliederung in Baugruppen oder Bauteile. Die anschließende Überführung in eine – flexiblere – abstraktere Modellierung ist jedoch ein wichtiger Schritt, um die Lösungsvariation zu erleichtern.

ante, für mehrere Varianten nacheinander oder für mehrere Lösungsvarianten parallel durchlaufen werden kann. Eine korrigierende Manipulation von Lösungsvarianten erfolgt dabei zwar ganz überwiegend anhand konkreter Produktmodellierungen (vgl. Kapitel 3.2, DYLLA 1991, S. 95f.), umfasst dabei jedoch immer den vollständigen Prozess von Dekomposition, Variation, Aggregation, Beurteilung und Entscheidung.

Der ständige multimodale Wechsel zwischen konkreten (*Bildern*) und abstrakten (*Begriffen*) Modellierungen ist zentraler Bestandteil dieses Vorgehensmodells. Dabei erfolgt dieser Wechsel – als wesentliche Grundlage der Verringerung des kognitiven Aufwands – mit zunehmender Erfahrung hoch prozeduralisiert, d.h. dass vor allem abstrakte Problem- und Lösungsrepräsentationen bei ausreichender Handlungssicherheit nicht in jedem Falle explizit erzeugt und extern dokumentiert werden (müssen). Dem Skizzieren und aufwandsarmen Modellieren kommt dabei eine entscheidende kognitive Vermittlerrolle zwischen beiden Modalitäten zu. Skizzen und aufwandsarme Modelle entlasten nicht nur das Arbeitsgedächtnis sondern dienen *direkt* der Erzeugung und Manipulation von Lösungen (vgl. PACHE ET AL. 2001, RÖMER 2002). Dabei verbinden sie aufgrund ihrer spezifischen Merkmale – in Skizzen können z.B. unterschiedliche Konkretisierungsstufen, unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe sowie bildliche und symbolhafte Darstellungen miteinander kombiniert werden – die Effizienz der bildlichen Darstellung mit der Flexibilität abstrakten Denkens in Konzepten und Begriffen (zur Bedeutung bildlicher Produktmodelle für kreative Entwurfsprozesse vgl. auch LIPPARDT 2000).

Eine Anpassung des Vorgehens an externe – z.B. organisationale – Einflüsse und typische Merkmale komplexer Entwurfsprobleme – widersprüchliche Ziele, Komplexität, Intransparenz, Freiheitsgrade, Dynamik, erforderliches Wissen (vgl. Kapitel 4.1.4.3) – erfolgt in diesem Vorgehensmodell durch die ständige Anpassung und Konkretisierung der Problem- und Anforderungsdefinition an den nach jedem Prozessdurchlauf höheren Wissensstand.

Individuelle Personenmerkmale finden in diesem Modell ihren Ausdruck darin, dass auch hier je nach individueller Neigung, Erfahrung und Kompetenz unterschiedliche Einstiegspunkte in den Prozess gewählt werden können. Zudem können die einzelnen Prozessschritte unterschiedlich stark betont und individuell Schwerpunkte bei der Wahl der Modalität der Problem- und Lösungsrepräsentation gesetzt werden. Hier gibt es wiederum eine deutliche Parallele zum Modell des erfahrungsgeliteten Lernens, in dem sich in Abhängigkeit von individuellen Lernstilen auf den Achsen *Abstrakt* ↔ *Konkret* und *Aktiv* ↔ *Reflexiv* solche Betonungen von Lernschritten und Modalitäten ausprägen (vgl. Kapitel 2.3.3, KOLB 1984, S. 65). Entscheidend für ein erfolgreiches Vorgehen ist dabei jedoch, dass unabhängig vom individuellen Vorgehensstil alle Schritte des Prozesses durchlaufen werden.

Dieses Vorgehensmodell ist nicht nur geeignet, reale Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse in der Konzept- und frühen Entwurfsphase deskriptiv abzubilden, es ist auch eine geeignete Grundlage für konkrete Handlungsempfehlungen. Die Entscheidung über den richtigen Einstiegspunkt in den Prozess, das iterative Durchlaufen der oben be-

schriebenen Arbeitsschritte und der Abbruch des Prozesses bei Erreichen einer die Anforderungen erfüllenden Lösung verlaufen zwar oft kognitiv hoch prozeduralisiert, d.h. überwiegend implizit und intuitiv, können jedoch auf der Basis dieses Vorgehensmodells gleichermaßen auch explizit und diskursiv reflektiert, geplant und umgesetzt werden. In diesem Sinne handelt es sich auch um ein präskriptives Vorgehensmodell, das Anleitung und Hilfestellung für die bewusste und systematische Vorgehensplanung, -steuerung und -kontrolle bietet. Die mit opportunistisch-assoziativer Vorgehenssteuerung verbundenen Vorteile können so genutzt, die damit ebenfalls verbundenen Risiken im Falle unzureichender Handlungssicherheit minimiert werden.

Für den Einsatz von Konstruktionsmethoden gilt in diesem Modell, dass diese ebenso flexibel, entsprechend der jeweiligen Problemlage zur Anwendung kommen. Dazu ist es hilfreich, wenn einige spezifische Methoden für bestimmte Prozessschritte im Rahmen eines Referenzprozesses (vgl. z.B. LONGMUEß 2003) vorab als Standardmethoden definiert und im relevanten Organisationsbereich systematisch eingeführt und trainiert werden können. Zusätzlich sollte ein Methodenpool im Sinne eines „Werkzeugkastens“ materiell und organisatorisch so bereitgestellt werden, dass im operativen Bereich auf benötigte Methoden problemadaptiert und effizient zugegriffen werden kann. Hierzu gehört die Bereitstellung der materiell-technischen Voraussetzungen, Verfahren und Hilfsmittel, ein gezieltes Methodentraining sowie eine verfahrensbezogene Beratung und Moderation bei der konkreten Anwendung dieser Methoden im Produktentwicklungsprozess.

6.3 Schlussfolgerungen für die Konstruktionsausbildung

Der Erwerb der für erfolgreiches Entwurfshandeln notwendigen Expertenkompetenz gehört zu den komplexesten menschlichen Lernprozessen. Im erwünschten Kompetenzprofil von Entwicklern und Konstrukteuren müssen über das Erlernen reiner Fachkompetenzen hinaus Wissensanteile und Fähigkeiten aus einer Reihe auch überfachlicher Kompetenzbereiche erlernt und integriert werden (Abbildung 6-3).

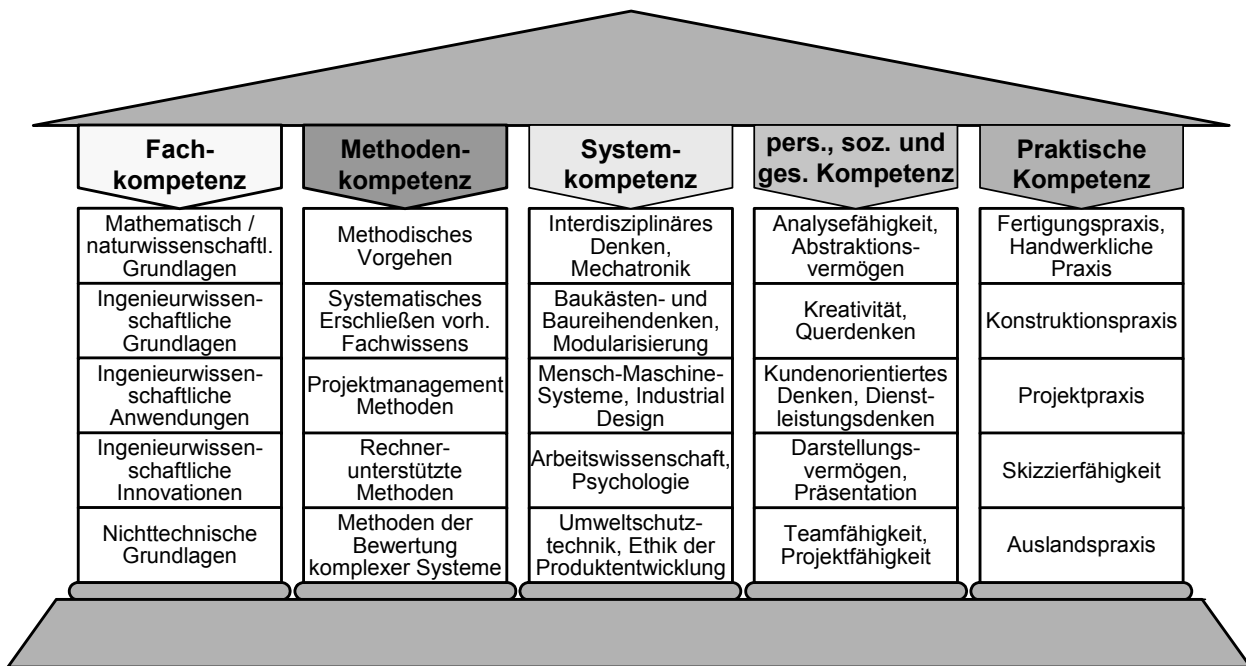


Abbildung 6-3: Die 5 Säulen der Qualifikation von Produktentwicklern (BEITZ & HELBIG 1997, S. 55)

Die wesentliche Herausforderung besteht dabei in der erfolgreichen Verbindung von explizit-deklarativer Vermittlung und impliziter Prozeduralisierung dieser Kompetenzen (Kapitel 2.3.3, vgl. auch LONGMUR 1998, S.27ff.). Erfahrung ist dabei die wesentliche Ressource, die diesen Prozess erfolgreich leiten kann.

Es ist unmittelbar einleuchtend, dass die in dieser Arbeit als besonders erfolgreich identifizierte opportunistisch-assoziative Vorgehensweise nicht direkt im Wege explizit-deklarativer Regelvermittlung gelehrt werden kann, da dieses Vorgehen eben nicht regelbasiert im Sinne algorithmischer Operatoren ist. Konstruktionsanfänger verfügen (noch) nicht über die für die erfolgreiche Umsetzung einer solchen Strategie notwendige Erfahrung. Gleichwohl können sie – wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte – diese Erfahrung auch schon in der Erstausbildung relativ schnell schrittweise erwerben. Für eine nachhaltige Verankerung angestrebter Kompetenzen muss dabei der zyklische Prozess des erfahrungsgeleiteten Lernens nach KOLB 1984 vollständig durchlaufen werden, wobei es auch hier nicht darauf ankommt, ob dieser Prozess – deduktiv – auf der Stufe abstrakter Konzepte oder – induktiv – auf der Stufe konkreter Erfahrung beginnt. Entscheidend ist nur, dass eine Reflexion konkreter Erfahrungen erfolgen muss, die zu einer Bildung abstrakter Handlungskonzepte führt, die wiederum in einem Schritt aktiver Erprobung in neuen Situationen zu neuen Erfahrungen auf einer dann höheren Wissens- bzw. Kompetenzstufe führen, und so fort. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass dabei vor allem vier Punkte zu beachten sind:

- Eine gründliche Problem- und Anforderungsanalyse ist ein zentraler Erfolgsfaktor für eine erfolgreiche Vorgehenssteuerung.

Ohne sorgfältige Problem- und Zieldekomposition basiert das Vorgehen auf einer opportunistischen Auswahl von Handlungszielen, verbunden mit einem hohen Risiko des vollständigen Scheiterns. Die Bedeutung dieser Phase des Prozesses wird bisher schon in

der konstruktionsmethodischen Ausbildung stark hervorgehoben und mit einer Vielzahl von Methoden unterstützt (vgl. z.B. PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 187ff.). Dieser Ansatz ist auch weiterhin nachdrücklich zu empfehlen. Eine gründliche Definition von Anforderungen und Randbedingungen bildet die Referenz für erfolgreiche Beurteilungsprozesse, welche wiederum Voraussetzung für die Gewinnung von Handlungssicherheit bei der Auswahl von Handlungsoptionen sind. Es sollte in der Erstausbildung jedoch stärker als bisher deutlich gemacht werden, dass Anforderungen kein statisches Ergebnis einer frühen Phase, sondern ein zentrales Steuerungsinstrument für das Handeln sind und deshalb über den gesamten Prozess eine fortlaufende Rückkopplung und Konkretisierung erfolgen muss.

- Eine systematische Beurteilung von Lösungsvarianten ist die Grundlage erfolgreicher opportunistisch-assoziativer Vorgehenssteuerung.

Wie in Kapitel 6.1 ausgeführt, ist Handlungssicherheit, die wesentlich auf Beurteilungssicherheit basiert, Grundlage für ein erfolgreiches und gleichzeitig kognitiv aufwandsarmes Vorgehen. Die Schulung der Fähigkeit, Lösungen zu beurteilen, ist deshalb traditionell ein überaus wichtiges Lernziel in der konstruktionsmethodischen Ausbildung. Es konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen bei der Beurteilung und Auswahl von Lösungsvarianten die Qualität der Konzeptlösungen positiv beeinflusste (vgl. Kapitel 5.3.1, insb. Tabelle 5-25). Zudem führte die Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen in dieser Phase zu deutlich zutreffenderen Beurteilungsergebnissen (vgl. Kapitel 5.3.1.1, insb. Tabelle 5-26). Diese Ergebnisse bestätigen das konstruktionsmethodische Konzept der systematischen Bestimmung der technisch-wirtschaftlichen Wertigkeit von Lösungskonzepten (vgl. VDI 2225 (1977), PAHL & BEITZ ET AL. 2003, S. 139ff.) nachdrücklich. Dieser Ansatz sollte auch weiterhin einen Schwerpunkt innerhalb der konstruktionsmethodischen Ausbildung bilden.

- Ein induktiver Prozessbeginn ist für Konstruktionsanfänger angemessener als ein deduktiver.

Im Gegensatz zum Ansatz der präskriptiven Konstruktionsmethodik sollte die Vermittlung konstruktionsmethodischer Handlungskompetenz induktiv am konkreten Beispiel ansetzen und darauf aufbauend den Prozess des erfahrungsgeliteten Lernens durch alle Phasen führen. Dafür spricht vor allem, dass eine Problemdekomposition anhand abstrakter Konzepte wie *Funktion* oder *Wirkprinzip* kognitiv weit aufwändiger ist als eine induktiv-konkrete und deshalb Konstruktionsanfänger überfordert. GEUPEL 1996 hat einen solchen didaktischen Ansatz vorgeschlagen, bei dem die Konstruktionsausbildung – gleichsam „rückwärts“ – auf dem konkreten Niveau ausgearbeiteter Lösungen beginnt und mit der abstrakten Konzeptformulierung endet. Dieses wurde von PAHL 1996 kritisiert, da so die Gefahr bestehe, dass die Leser „[...] in baustrukturellem und bildlichem Denken verhaftet [...] bleiben.“ Bei Übertragung des zyklischen Modells des erfahrungsgeliteten Lernens besteht diese Gefahr nicht: Auch beim induktiven Einstieg erfolgt die reflexive Analyse und abstrakte Konzeptbildung. Ein solches Vorgehen konnte in der

Konstruktionsausbildung bereits sehr erfolgreich eingeführt werden (vgl. LONGMUEß ET AL. 1995, BEITZ ET AL. 1997B, LONGMUEß 1998, S. 32ff., BENDER, (BEATE) & LONGMUEß 1999,). Dieser Ansatz ist außerdem die Grundlage der – auf BARROWS 1980 zurückgehenden – international weit verbreiteten Konzepte zum „problem-based-learning“ (für einen Überblick vgl. z.B. DE GRAAFF & KOLMOS 2003, DE GRAAFF ET AL. 2003).

- Für Konstruktionsanfänger stellt zunächst eine hierarchisch-objektorientierte Problemdekomposition die geeignete Form der Komplexitätsreduktion dar.

Es konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass auch eine hierarchisch-objektorientierte Vorgehenssteuerung einer hierarchisch-prozessorientierten deutlich überlegen ist, wenn auch nicht in so hohem Maße wie das opportunistisch-assoziative Vorgehen. Die hierarchisch-objektorientierte Strategie hat für Anfänger jedoch den Vorteil, dass sie sehr gut explizit lehrbar ist, weil sie auf einer Dekompositionsregel basiert, die in geringerem Maße von Erfahrung abhängt. Gerade bei einem induktiven Prozessbeginn auf der Basis einer vorliegenden oder durch „vorgreifende“ Konkretisierung gewonnenen *konkreten* Lösungsidee kann eine Aufteilung in (Funktions-)Baugruppen entlang angebbarer Kriterien vorgenommen werden, die auch für Anfänger leicht vermittelbar sind. Mit wachsender Handlungssicherheit auf der Basis fortschreitender Konstruktionserfahrung können schrittweise opportunistisch-assoziative Handlungsanteile in die Vorgehenssteuerung integriert werden. Die anfänglich erlernte hierarchisch-objektorientierte Dekompositionsstrategie bleibt jedoch als risikomindernde „kognitive Rückfallebene“ in Situationen nicht ausreichender Handlungssicherheit als Erfolg versprechende Strategie erhalten.

Diese vier Kernpunkte sollten im Rahmen eines strukturierten didaktischen Konzepts (vgl. BENDER & BEITZ 1999, BENDER 2001) Eingang in die universitäre Erstausbildung von Konstrukteuren finden. In einem solchen Konzept sollte die klassische Vermittlung von Sach- und Regelwissen in Vorlesungen und Hörsaalübungen ergänzt werden durch moderne projektorientierte und problembasierte Lehrkonzepte, in denen ein eigenständiger und mindestens in Teilen selbstbestimmter Prozess des erfahrungsgeliteten Lernens moderierend und motivierend unterstützt wird (Abbildung 6-4).

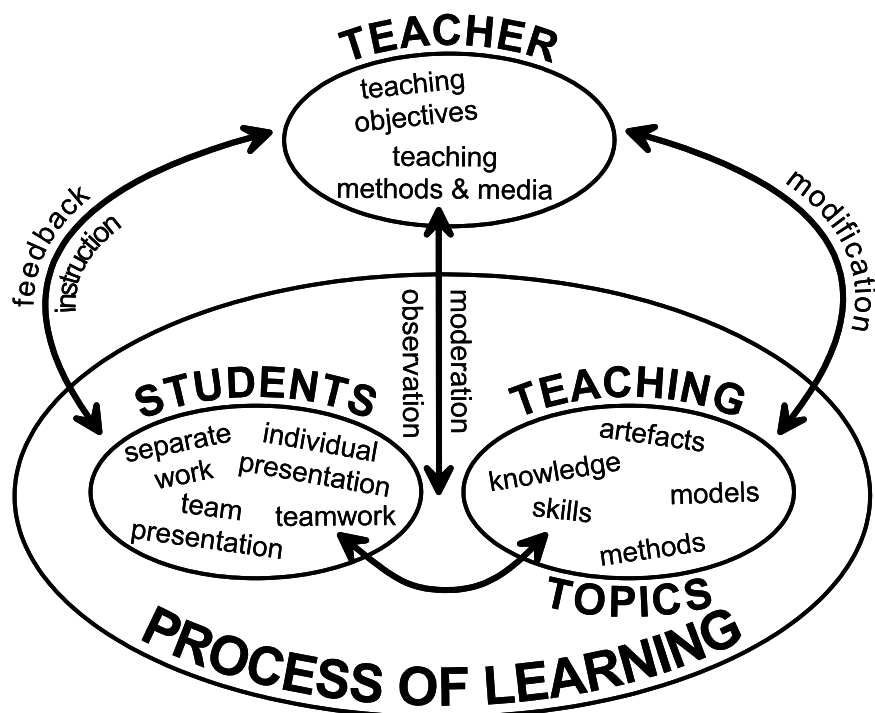


Abbildung 6-4: Moderation von Lernprozessen in der Konstruktionsausbildung (BENDER 2001, S. 339)

Dabei verändert sich auch die Rolle der Lehrenden: Sie sind nicht mehr alleinige Träger eines expliziten Sach- und Regelwissens, das sie auf die Studierenden „übertragen“ müssen, sondern vor allem anleitende Moderatoren und Trainer für den Prozess der schrittweisen Prozeduralisierung beim selbständigen, erfahrungsgeleiteten Kompetenzerwerb. Dabei sollte eine Unterstützung dieses Prozesses durch moderne Konzepte und Methoden des Wissensmanagements erfolgen (vgl. BENDER & LONGMUEß 2003).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Hauptgegenstand dieser Arbeit ist die Anwendbarkeit und der Nutzen konstruktionsmethodischer Ausbildung und konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen in der Konzept- und frühen Entwurfsphase des Produktentwicklungsprozesses. Dabei stehen drei empirische Forschungsfragen im Vordergrund (vgl. Kapitel 1.1.2):

- Welchen Einfluss hat eine *konstruktionsmethodische Ausbildung* auf den erzielbaren *Konstruktionserfolg* in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?
- Welchen Einfluss hat eine *konstruktionsmethodische Ausbildung* auf das *tatsächliche Vorgehen* beim Konstruieren in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?
- Welchen Einfluss hat das *tatsächliche Vorgehen* beim Konstruieren auf den erzielbaren *Konstruktionserfolg* in der Konzept- und frühen Entwurfsphase?

7.1 Konstruktionsmethodik und reale Entwurfsprozesse: Ein Gegensatz?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde – mit einem Fokus auf den deutschsprachigen Raum – zunächst die Entwicklung der präskriptiven Konstruktionsforschung der letzten Jahrzehnte nachgezeichnet (Kapitel 2.1). Häufig geäußerte Kritik und Fragen der Anwendbarkeit und Akzeptanz dieses Ansatzes in der Produktentwicklungspraxis wurden diskutiert (Kapitel 2.2). Die deskriptive Konstruktionsforschung konnte in einer Vielzahl empirischer Untersuchungen realer und experimenteller Entwurfsprozesse einige der häufig genannten Kritikpunkte bestätigen (Kapitel 3). Eine vergleichende Analyse einschlägiger Arbeiten aus diesem Bereich ergab, dass tatsächlich beobachtete Entwurfsprozesse eine Reihe charakteristischer Hauptmerkmale aufweisen, die im Widerspruch zu Vorgehensmodellen der präskriptiven Konstruktionsmethodik stehen (Kapitel 3.3). Demnach gilt für reale Entwurfsprozesse:

- Sie verlaufen nicht linear-sequentiell sondern weisen einen allgemein iterativen Prozessverlauf auf.
- Sie zeichnen sich durch eine fortlaufende Problem- und Zielklärung über den gesamten Prozessverlauf aus.
- Sie basieren auf einer zunächst notwendig unvollständigen, vorläufigen Problemdekomposition.
- Sie sind durch eine kognitiv aufwandsarme, erfahrungsbasierte, „opportunistische“ Nutzung von Handlungsoptionen gekennzeichnet.
- Sie sind weit häufiger durch ein auf früher Konkretisierung basierendes korrigierendes Vorgehen charakterisiert als durch eine generierende Verfolgung paralleler Lösungsvarianten.
- Sie werden durch Personenmerkmale wie Erfahrung und (heuristische) Kompetenz entscheidend beeinflusst.

- Sie sind gekennzeichnet durch einen ständigen multimodalen Wechsel zwischen visuellen (Bildern) und abstrakt-verbale (Begriffen) Problem-, Ziel- und Lösungsrepräsentationen.
- Sie werden durch organisationale Einflüsse wie übergeordnete Managementprozesse oder die Organisation von Kommunikation und Kooperation geprägt.
- Sie unterliegen dynamischen Veränderungen von Anforderungen, Zielen und Randbedingungen.
- Sie verfolgen eher das Ziel, zufrieden stellende Lösungen unter akzeptablem Aufwand zu entwickeln als ideale Lösungen.

7.2 Ergebnisse der Laborstudie

Aufbauend auf diesen analytisch-theoretischen Vorüberlegungen wurde in einer Laborstudie (Kapitel 4) untersucht, ob und wie sich eine konstruktionsmethodische Ausbildung auf das Vorgehen und den Konstruktionserfolg von Studierenden im Verlaufe ihres Ausbildungsfortschritts auswirkt. In einem verlaufsorientierten ex post facto Studiendesign wurden auf der Basis großer Fallzahlen (71 Versuchspersonen und 83 auswertbare Fälle) die folgenden Ergebnisse erzielt (Kapitel 5):

- Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung auf den Konstruktionserfolg

In der Konzeptphase konnte kein positiver Einfluss frischer, rein theoretisch vermittelter konstruktionsmethodischer Ausbildung auf die Lösungsgüte beobachtet werden und auch eine vertiefte konstruktionsmethodische Ausbildung zeigte nicht die erwarteten positiven Effekte. In der frühen Entwurfsphase traten dagegen die erwarteten Effekte auf: Eine „frische“ konstruktionsmethodische Ausbildung führte nicht zu besseren Ergebnissen, die Vertiefung in einem sechsmonatigen Konstruktionsprojekt erhöhte dagegen den Konstruktionserfolg in dieser Kategorie.

- Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung auf das tatsächlich beobachtete Vorgehen

In der Konzeptphase wurde – wie erwartet – eine frische, rein theoretische konstruktionsmethodische Ausbildung zunächst nicht handlungswirksam, während sich die vertiefte konstruktionsmethodische Ausbildung deutlich im beobachteten Vorgehen niederschlug. Die so ausgebildete Versuchsgruppe führte insgesamt beim Konzipieren deutlich mehr Basisoperationen des konstruktionsmethodischen Vorgehens aus als alle anderen Untersuchungsgruppen. In der Teilphase der Lösungsbeurteilung und Auswahlentscheidung war zwar eine allgemeine Tendenz zu systematischerem Vorgehen und umfassenderer Beurteilung von Lösungsvarianten über die drei Ausbildungsniveaus hinweg erkennbar, jedoch ohne dass sich hierbei ein signifikanter Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung nachweisen ließ. Eher ist hier von einer allgemein gewachsenen Handlungskompetenz mit zunehmendem Ausbildungsfortschritt auszugehen.

In der Vorentwurfsphase konnte kein systematischer und signifikanter Einfluss konstruktionsmethodischer Ausbildung auf das tatsächliche Vorgehen beobachtet werden. Ledig-

lich schwache Hinweise ließen sich finden, dass ein frühes Anfängerniveau eine hierarchisch-prozessorientierte Vorgehensweise als eine Art kognitiver Basisstrategie eher hervorbringt als andere Vorgehensweisen.

- Einfluss des tatsächlich beobachteten Vorgehens auf den Konstruktionserfolg

In der Konzeptphase konnte ein Einfluss der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen – bis auf eine Tendenz zur Verminderung des Entwicklungsrisikos – nicht nachgewiesen werden. Sehr deutlich war dagegen ein positiver Einfluss der Befolgung konstruktionsmethodischer Handlungsempfehlungen bei der Lösungsbeurteilung und -auswahl auf die Qualität der Konzeptlösungen. Auch erhöhte konstruktionsmethodisches Vorgehen die Qualität der Konzeptbeurteilungen selbst.

Für die frühe Entwurfsphase wurde deutlich, dass eine strikte Befolgung konstruktionsmethodischer Vorgehensempfehlungen zu signifikant schlechteren Ergebnissen im Vergleich zu allen anderen Vorgehensweisen führte. Deutlich erfolgreicher war eine globale Ablaufsteuerung, die auf einer *hierarchisch-objektorientierten* oder – noch überlegener – *opportunistisch-assoziativen* Dekomposition der Problemstellung basierten. Diese Strategien entsprechen den Anforderungen der menschlichen Problemlöser unter dem Gesichtspunkt der kognitiven Ökonomie offenbar weit eher als eine hierarchisch-prozessorientierte Problemdekomposition und Vorgehensplanung entlang abstrakter Prozessmerkmale.

7.3 Konzipieren und Entwerfen als zielgerichteter Lernprozess

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ein deskriptives Modell des individuellen Entwurfshandelns entwickelt, das als konstituierendes Element die iterative Struktur realer Entwurfsprozesse abbildet (Kapitel 6.2). Entwurfshandeln wird in diesem Modell als zielgerichteter, erfahrungsgeleiteter Lernprozess verstanden, bei dem Anforderungen und Ziele – auf der Grundlage einer fortlaufenden Problem-, Ziel- und Anforderungskonkretisierung – als zentrales Steuerungsinstrument fungieren. Abweichend von bisherigen konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen kann in diesem Modell auch ein *induktiver* Prozessbeginn gewählt werden, der – einer opportunistischen Handlungssteuerung entsprechend – auf einer schnellen Konkretisierung einer oder mehrerer Erfolg versprechender (Teil-)Lösungen basiert. Dabei kann im Falle einfacher Entwurfsprobleme auch direkt eine zufrieden stellende Lösung identifiziert und der Prozess abgebrochen werden. Ist dies nicht der Fall, muss der weitere Prozess ausgehend von diesem Punkt solange iterativ durchlaufen werden, bis eine zufrieden stellende Lösung gefunden ist. Dabei sind ungeeignete Lösungen, die zu größeren Rücksprüngen im Prozess zwingen, keine um jeden Preis zu vermeidenden Irrwege, sondern führen, sofern sie im Wege der Analyse und Beurteilung im zyklischen Lernprozess erkannt und nicht weiterverfolgt werden, zu einem höheren Wissensniveau, das in weiteren Prozessschritten die Prozesssicherheit erhöht.

Ein ständiger multimodaler Wechsel zwischen konkreten (*Bildern*) und verbal-abstrakten (*Begriffen*) Modellierungen ist zentraler Bestandteil dieses Vorgehensmodells. Dabei er-

folgt dieser Wechsel – als wesentliche Grundlage der Verringerung des kognitiven Aufwands – mit zunehmender Erfahrung kognitiv hoch prozeduralisiert, d.h. dass vor allem abstrakte Problem- und Lösungsrepräsentationen bei ausreichender Handlungssicherheit nicht notwendigerweise explizit erzeugt und extern dokumentiert werden. Dem Skizzieren und aufwandsarmen Modellieren kommt dabei eine entscheidende kognitive Vermittlerrolle zwischen beiden Modalitäten zu.

Dieses Vorgehensmodell ist nicht nur geeignet, reale Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse in der Konzept- und frühen Entwurfsphase deskriptiv abzubilden, es stellt auch eine geeignete präskriptive Grundlage für konkrete Handlungsempfehlungen dar.

7.4 Schlussfolgerungen für die konstruktionsmethodische Ausbildung

Die konstruktionsmethodische Ausbildung schließlich muss die explizit-deklarative Vermittlung von Sach- und Regelwissen mit der Unterstützung der Prozeduralisierung der so vermittelten Kompetenzen verbinden. Im erwünschten Kompetenzprofil müssen dabei über das Erlernen reiner Fachkompetenzen hinaus Wissensanteile und Fähigkeiten auch aus überfachlichen Kompetenzbereichen erlernt und integriert werden. Erfahrung ist auch hier die wesentliche Ressource, die diesen Prozess erfolgreich leiten kann. Da die in dieser Arbeit als besonders erfolgreich identifizierte opportunistisch-assoziative Vorgehensweise nicht direkt im Wege explizit-deklarativer Regelvermittlung gelehrt werden kann, muss für eine nachhaltige Verankerung der angestrebten Kompetenzen der zyklische Prozess des erfahrungsgeliteten Lernens vollständig und wiederholt durchlaufen werden, wobei es auch hier nicht darauf ankommt, ob dieser Prozess – deduktiv – auf der Stufe abstrakter Konzepte oder – induktiv – auf der Stufe konkreter Erfahrung beginnt. Entscheidend ist nur, dass eine Reflexion konkreter Erfahrungen erfolgen muss, die zu einer Bildung abstrakter Handlungskonzepte führt, die wiederum in einem Schritt aktiver Erprobung in neuen Situationen zu neuen Erfahrungen auf einer dann höheren Wissens- bzw. Kompetenzstufe führen und so fort. Dabei sind vier Kernpunkte zu beachten (vgl. Kapitel 6.3):

- Eine gründliche Problem- und Anforderungsanalyse ist ein zentraler Erfolgsfaktor für eine erfolgreiche Vorgehenssteuerung.
- Die systematische Beurteilung von Lösungsvarianten ist die Grundlage erfolgreicher opportunistisch-assoziativer Vorgehenssteuerung.
- Ein induktiver Prozessbeginn ist für Konstruktionsanfänger angemessener als ein deduktiver.
- Für Konstruktionsanfänger stellt die hierarchisch-objektorientierte Problemdekomposition anfangs und in Situationen nicht ausreichender Handlungssicherheit die geeignete Form der Komplexitätsreduktion dar.

Diese Punkte sollten im Rahmen eines strukturierten didaktischen Konzepts, in dem die klassische Vermittlung von Sach- und Regelwissen durch projektorientierte und problembasierte Lehrkonzepte erweitert wird, Eingang in die universitäre Erstausbildung von

Konstrukteuren finden. Dabei wird ein eigenständiger und mindestens in Teilen von den Studierenden selbstbestimmter Prozess des erfahrungsgeleiteten Lernens moderierend und motivierend in Gang gesetzt, angeregt und unterstützt.

7.5 Ausblick

Im Rahmen zukünftiger Forschung wäre zunächst darüber nachzudenken, wie die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse in konkrete Interventionskonzepte für die universitäre Konstruktionsausbildung umgesetzt werden können. Dabei kann aufgebaut werden auf bisherige erfolgreiche Reformbemühungen, die das Projektstudium an der TU Berlin als integralen Teil der Konstruktionsausbildung etablieren konnten (LONGMUß ET AL. 1995, LONGMUß 1998, BENDER, (BEATE) & LONGMUß 1999). Eine sinnvolle Weiterentwicklung könnte hier im Aufbau einer Arbeitsumgebung, eines Methodenpools und einer Moderationskompetenz – zum Beispiel in einem „Konzeptlabor“ – bestehen. Hier könnte in Workshops zum einen ein gezieltes Methodentraining stattfinden, zum anderen könnten Projektarbeitsgruppen besser als bisher bei Vorliegen eines konkreten Unterstützungsbedarfs gezielt auf eine professionell betreute Methodenanwendung zugreifen.

Auch für die industrielle Produktentwicklungspraxis können auf Basis der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse neue Ansätze zur verbesserten Unterstützung von Produktentwicklungsprozessen entworfen werden. Notwendig wären hier Referenzprozesse und Prozessleitlinien, die zum einen den notwendig iterativen Charakter solcher Prozesse von Beginn an berücksichtigen und unterstützen und zum anderen das Management von Zielen und Anforderungen als zentrales Steuerungsinstrument des Prozesses nutzen. So könnten systematisch ermittelte kritische Anforderungen – in Analogie zu kritischen Pfaden in Projektmanagementkonzepten – als *technische* Meilensteine die Grundlage für eine fortlaufende und rekursive Zielverfolgung der technischen Produktentstehung bilden. Die Identifikation von Zielen und Anforderungen sowie die Art und Weise und der Zeitpunkt der Verifizierung ihrer Erreichung bzw. Erfüllung könnten dabei parallel zu zeitlichen und wirtschaftlichen Steuerungskriterien in Projektplänen abgebildet werden (vgl. auch den Ansatz des „Zielorientierten Kooperationsmanagements in der Produktentwicklung“ bei BENDER, (BEATE) 2001).

Ähnlich wie für den Bereich der konstruktionsmethodischen Ausbildung wäre sehr wahrscheinlich auch für die Produktentwicklungspraxis die materielle und organisatorische Bereitstellung eines Methodenpools im Sinne eines „Werkzeugkastens“ – verbunden mit unterstützender Moderationskompetenz – nützlich. In einem solchen „Konzeptlabor für die Praxis“ könnten Methodeneinführung und Methodentraining „on the job“, also praxisnäher und effizienter, stattfinden. Auch der situationsangepasste Zugriff auf Konstruktionsmethoden könnte verbessert werden. Voraussetzung dafür wäre, dass zunächst im Rahmen empirischer Forschungsvorhaben Potenziale und Eckpunkte eines solchen Konzeptes unter Praxisbedingungen untersucht würden.

Die Konstruktionsmethodik als theoretischer Rahmen bleibt dabei auch weiterhin die maßgebliche Grundlage.

8 Anhang

8.1 Konstruktionsaufträge aus der Laborstudie

Im folgenden werden die in der Laborstudie eingesetzten Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase und für die Vorentwurfsphase dokumentiert.

8.1.1 Konstruktionsaufträge für die Konzeptphase

- Konzeptauftrag Glasmühle

Technische Universität Berlin
Institut für Maschinenkonstruktion
- Konstruktionstechnik -
DFG 479/68-1, E1

Vpn-Nummer:

Konzeptaufgabe E1

Aufgabenstellung:

Lösungssuche -variation und -bewertung für eine Glasmühle

In der Region Koforidua in Ghana werden aus einem Glasgranulat Glasperlen hergestellt. Das Granulat wird bisher durch manuelles Zerstampfen aus Altglas (Flaschen, Fensterscheiben etc.) gewonnen. Die Zerkleinerung der Glasabfälle soll jedoch künftig mit Hilfe einer Glasmühle erfolgen, die in ländlichen Gegenden mit einem Verbrennungskraftmotor betrieben werden kann. Gesucht werden Lösungskonzepte, die zur Zerkleinerung von Glasabfällen im beschriebenen Einsatzfeld geeignet sind.

Aufgabenstellung:

- Es sind mindestens drei unterschiedliche Konzeptvarianten für die Glasmühle zu erarbeiten.
- Die Lösungskonzepte sind in Skizzenform so zu visualisieren, daß das Wirkprinzip und die geometrische Anordnung der maßgeblichen Komponenten erkennbar ist.
- Alle Konzeptvarianten sind zusätzlich kurz zu beschreiben und zu beurteilen (Funktion, wesentliche Merkmale, Vor- und Nachteile).

- Konzeptauftrag Gartenhäcksler

Technische Universität Berlin
Institut für Maschinenkonstruktion
- Konstruktionstechnik -
DFG 479/68-1, O1

Vpn-Nummer:

Konzeptaufgabe O1

Aufgabenstellung:

Lösungssuche -variation und -bewertung für einen Gartenhäcksler

Die Zahl der Gartenbesitzer wird immer größer. Im Verlaufe eines Gartenjahres fallen je nach Grundstücksgröße mehr oder weniger große Mengen von Grünabfällen, Ästen und Reisig an. Hierdurch entsteht das Problem, wohin mit dem Bio-Müll? Ein leistungsstarker Gartenhäcksler bietet die optimale Lösung. Das anfallende Abfallvolumen wird reduziert und das gewonnene Häckselgut eignet sich hervorragend für die Kompostierung oder zum Mulchen. Das Holz wird per Hand zugeführt, durch einen entsprechenden Mechanismus zerkleinert und definiert ausgeworfen.

Aufgabenstellung:

- Es sind mindestens drei unterschiedliche Konzeptvarianten für die Zerkleinerung von Holz zu erarbeiten.
- Die Lösungskonzepte sind in Skizzenform so zu visualisieren, daß das Wirkprinzip und die geometrische Anordnung der maßgeblichen Komponenten erkennbar ist.
- Alle Konzeptvarianten sind zusätzlich kurz zu beschreiben und zu beurteilen (Funktion, wesentliche Merkmale, Vor- und Nachteile).

- Konzeptauftrag Papier-Cutter

Technische Universität Berlin
Institut für Maschinenkonstruktion
- Konstruktionstechnik -
DFG 479/68-1, L1

Vpn-Nummer:

Konzeptaufgabe L1

Aufgabenstellung:

Lösungssuche -variation und -bewertung für einen Paper-Cutter

Automatisierte Industriedrucker arbeiten einzelne Druckaufträge ab, ohne daß ein Bediener am Gerät erforderlich ist. Zum Bedrucken wird Endlospapier verwendet, das nach Beendigung eines Druckauftrags zertrennt wird, um es der weiteren Verarbeitung (Stapeln, Sortieren, Binden usw.) zuzuführen.

Gesucht werden Lösungskonzepte für das Trennen des aus dem Drucker herausgeführten Endlospapiers.

Aufgabenstellung:

- Es sind mindestens drei unterschiedliche Konzeptvarianten für den Paper-Cutter zu erarbeiten.
- Die Lösungskonzepte sind in Skizzenform so zu visualisieren, daß das Wirkprinzip und die geometrische Anordnung der maßgeblichen Komponenten erkennbar ist.
- Alle Konzeptvarianten sind zusätzlich kurz zu beschreiben und zu beurteilen (Funktion, wesentliche Merkmale, Vor- und Nachteile).

8.1.2 Konstruktionsaufträge für die Vorentwurfsphase

- Vorentwurfsauftrag Glasmühle

Technische Universität Berlin
 Institut für Maschinenkonstruktion
 - Konstruktionstechnik -
 DFG 479/68-1, E2

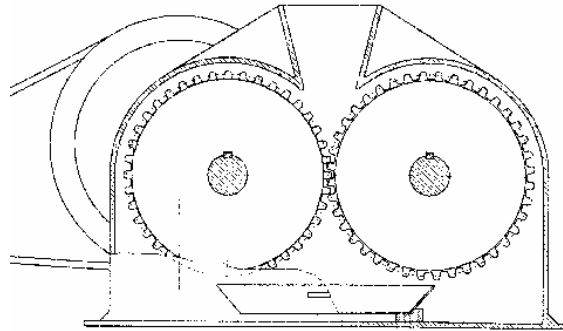
Vpn-Nummer:

Entwurfsaufgabe E2

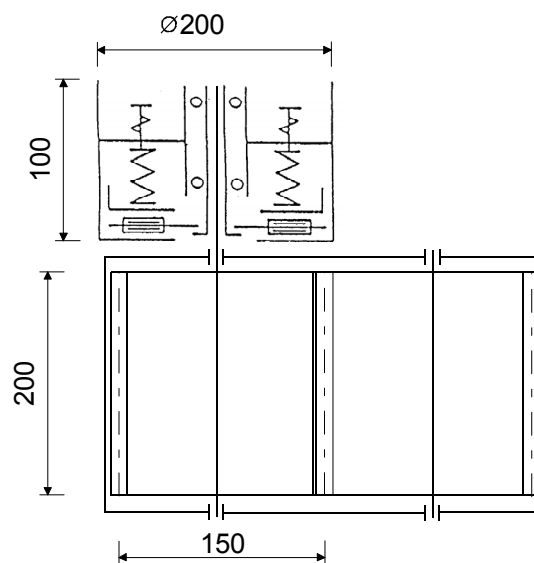
Aufgabenstellung:

Konstruktion einer Glasmühle

Es ist eine Glasmühle zur Zerkleinerung von Glasabfällen gemäß dem folgenden Wirkprinzip zu konstruieren.



Die Drehmomentübertragung vom Antriebsmotor auf die Glasmühle erfolgt über einen Flachriemen. In die Flachriemenscheibe an der Glasmühle ist als Überlastschutz eine Sicherheitsrutschkupplung integriert. Die Glasmühle inkl. der Sicherheitsrutschkupplung ist gemäß folgender Prinzipskizze zu konstruieren.



- 2 -

Anforderungen und Konstruktionsmerkmale:

- Einhaltung der Prinzipskizze und der vorgegebenen Daten
- Sicherheitsrutschkupplung in Aufsteckbauweise für ein Wellenende DIN 748 40 x 110
- Trockenkupplung
- die Normalkraft ist über eine Schraubenfeder aufzubringen, Federkraft einstellbar!
- Kupplung nach außen abgedichtet
- alle Lagerungen nach Fest-Loslager-Prinzip, fettgeschmiert mit separaten Dichtungen
- Gehäuse der Glasmühle in Gußausführung, Gehäuseteilung in der Wellenebene
- Flachriemenscheibe mit Sicherheitsrutschkupplung geschweißt

Auslegungsmerkmale:

Antriebswelle (\varnothing_{\min})	40 mm
Welle der zweiten Zahnwalze (\varnothing_{\min})	30 mm
Teilkreis- \varnothing der Zahnwalzen	150 mm
Breite der Zahnwalzen	200 mm
Achsabstand	150 mm
Modul m	4 mm
Riemenscheibe (\varnothing x b)	200 mm x 100 mm
Kupplungsreibscheibe (\varnothing_m x b)	150 mm x 20 mm
Feder (d x D x l_v)	6 mm x 150 mm x 50 mm

- Vorentwurfsauftrag Gartenhäcksler

Technische Universität Berlin
 Institut für Maschinenkonstruktion
 - Konstruktionstechnik -
 DFG 479/68-1, O2

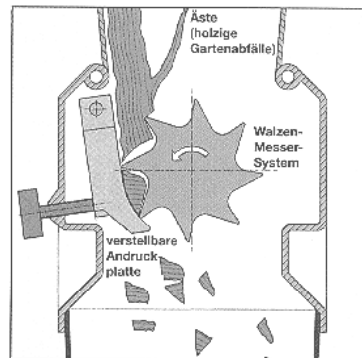
Vpn-Nummer:

Entwurfsaufgabe O2

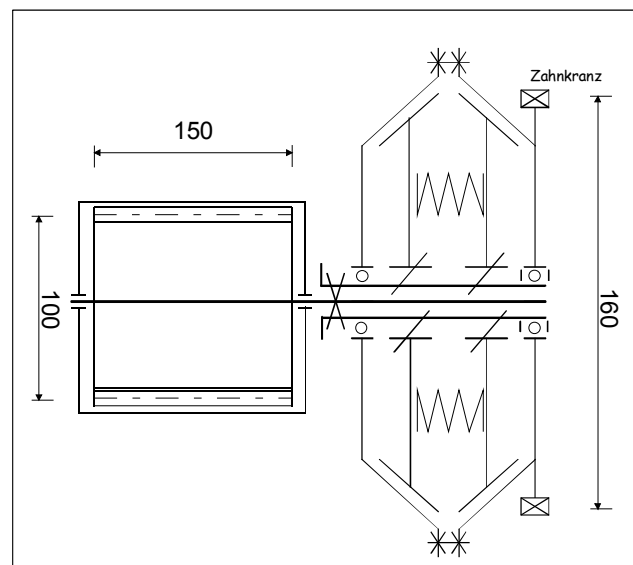
Aufgabenstellung:

Konstruktion eines Gartenhäckslers

Es sind Teile eines Gartenhäckslers zur Zerkleinerung von Holz und Gartenabfällen gemäß dem folgenden Wirkprinzip zu konstruieren.



Über eine leicht zugängliche Öffnung wird Holz und Geäst zugeführt, welches dann im Schneidwerk zerkleinert wird. Der Antrieb des Walze-Messer-Systems erfolgt mit einem Elektromotor. Aus Sicherheitsgründen ist das Schneidwerk mit einer Sicherheitsrutschkupplung ausgerüstet. Das Schneidwerk inkl. der Sicherheitsrutschkupplung ist gemäß folgender Prinzipskizze zu konstruieren. Die Sicherheitsrutschkupplung ist als Doppelkegelkupplung in Gußausführung auszulegen, Schneidwerkgehäuse / Holzeinwurf als Blechkonstruktion. Die Andruckplatte gehört nicht zum Konstruktionsumfang.



- 2 -

Anforderungen und Konstruktionsmerkmale:

- Einhaltung der Prinzipskizze und der vorgegebenen Daten
- Sicherheitsrutschkupplung in Aufsteckbauweise für ein Wellenende DIN 748 40 x 110
- Trockenkupplung
- die Normalkraft ist über **eine** Feder aufzubringen
- Kupplung nach außen abgedichtet
- alle Lagerungen nach Fest-Loslager-Prinzip, fettgeschmiert mit separaten Dichtungen
- Gehäuse des Gartenhächslers in Blechausführung, Wälzlager in eingeschraubten Flanschgehäusen in Schweißausführung!

Auslegungsmerkmale:

Antriebswelle (\varnothing_{\min})	40 mm
Teilkreis- \varnothing der Schneidwalze	100 mm
Breite der Schneidwalze	150 mm
Kupplungsreibscheibe $\varnothing_{\text{ausen}}$	180 mm
Kupplungsreibscheibe $\varnothing_{\text{innen}}$	150 mm
Reibflächenwinkel	45°
Feder (d x D x l _v)	6 mm x 120 mm x 50 mm
Zahnkranz-Teilkreis- \varnothing	160 mm
Zahnkranz Modul m	4 mm

- Vorentwurfsauftrag Paper-Cutter

Technische Universität Berlin
 Institut für Maschinenkonstruktion
 - Konstruktionstechnik -
 DFG 479/68-1, L2

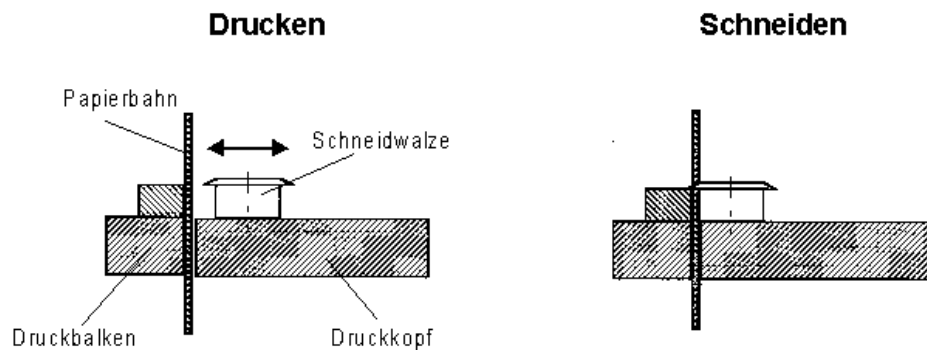
Vpn-Nummer:

Entwurfsaufgabe L2

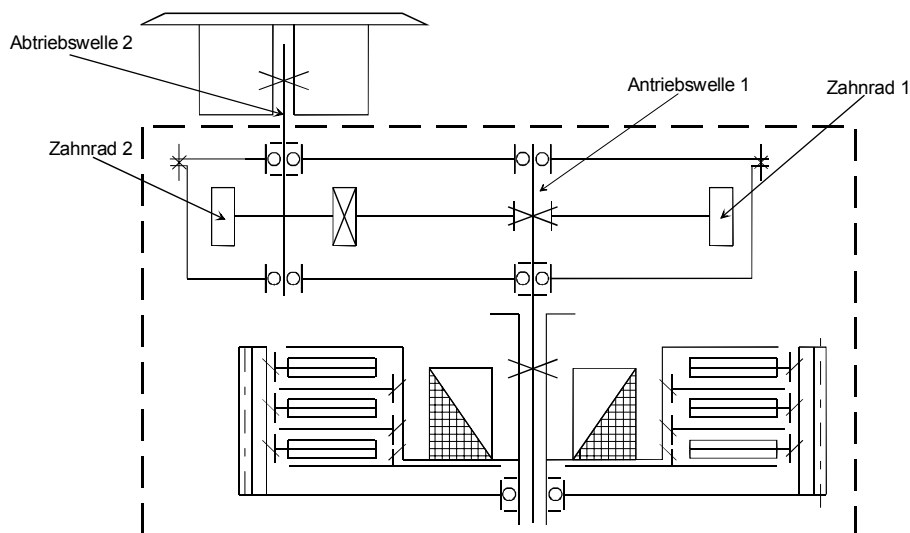
Aufgabenstellung:

Konstruktion eines Paper-Cutters

Es ist ein Paper-Cutter zum Abschneiden von Endlospapier, das aus einem Industriedrucker herausgeführt wird, gemäß dem folgenden Wirkprinzip zu konstruieren.



Der Antrieb der Schneidwalze erfolgt über einen Zahnriementrieb und ein einstufiges Stirnradgetriebe. Das Drehmoment wird für den Schneidvorgang über eine elektromagnetische Schaltkupplung auf die Schneidwalze übertragen. Der Antrieb der Schneidwalze inkl. der elektromagnetischen Kupplung ist gemäß folgender Prinzipskizze (gestrichelter Bereich) zu konstruieren:



- 2 -

Anforderungen und Konstruktionsmerkmale:

- Einhaltung der Prinzipskizze und der vorgegebenen Daten
- elektromagnetische Lamellen-Schaltkupplung in Aufsteckbauweise für ein Wellenende DIN 748 20 x 50 (Antriebswelle 1)
- alle Lagerungen im Getriebe nach Fest-Loslager-Prinzip, ölgeschmiert
- Gehäuse des Stirnradgetriebes in Gußausführung
- Zahnriemenscheibe mit integrierter Schaltkupplung in Schweißausführung, Wälzlager fettgeschmiert mit separaten Dichtungen

Auslegungsmerkmale:

Wellenende 1 (Antriebswelle) ($(\varnothing_{\min} \times l)$)	20 mm x 50 mm
Wellenende 2 (Abtriebswelle) ($(\varnothing_{\min} \times l)$)	16 mm x 28 mm
Teilkreis- \varnothing Zahnrad 1	114 mm
Teilkreis- \varnothing Zahnrad 2	54 mm
Achsabstand	84 mm
Modul m	2 mm
Zahnriemenscheibe ($\varnothing \times b$)	140 mm x 50 mm
Kupplungsreibrscheiben ($\varnothing_m \times b$)	100 mm x 15 mm
Elektromagnet ($\varnothing_m \times h \times b$)	50 mm x 10 mm x 15 mm

8.2 Kodierungshilfen für die Vorgehensanalyse

Die Kodierung der erhobenen Vorgehensmerkmale wurde durch Kodierungshilfen unterstützt, die hier dokumentiert werden..

8.2.1 Kodierungshilfe für die Vorgehensanalyse in der Konzeptphase

In der Konzeptphase konnten keine Verlaufsdaten aus der fortlaufenden Fotodokumentation des Vorgehens gewonnen werden, da für die Erhebung der Baseline auf dem Ausbildungsniveau A1 die dafür benötigte digitale Fototechnik noch nicht zur Verfügung stand (vgl. Kapitel 4.2.1). Die Vorgehensanalyse stützte sich deshalb auf die Auswertung der von den Versuchspersonen angefertigten Dokumente; die fotografische Verlaufsdocumentation diente dort, wo sie verfügbar war, zur Absicherung von Zweifelsfällen. Unterstützt wurde dies Kodierung durch Kodierungsbeispiele. Die hier dokumentierten Kodierungsbeispiele folgen der Gliederung des Erfassungsbogens für die Vorgehenserfassung in der Konzeptphase (vgl. Abbildung 4-13, S. 144).

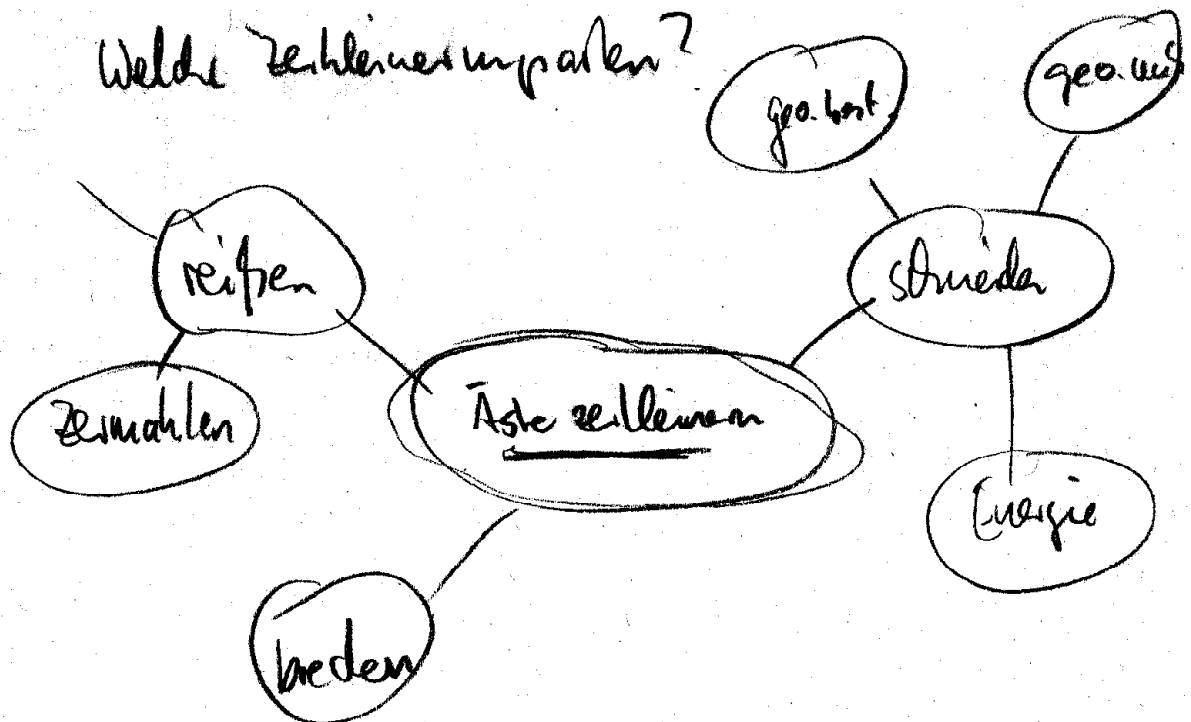
Phase	Information
Tätigkeit:	Aufgabenstellung klären, Anforderungen formulieren
Methode	Merkmallisten
mögl. Arbeitsergebnis	Anforderungsliste
erläuternde Hinweise	explizite Auflistung von Anforderungen
Beispiel	<p style="text-align: center;"><u>Anforderungsliste</u></p> <p> r - sicher: Benutze darf nicht gefährdet werden (z.B. durch aus dem Einzug herausfliegende Teile) </p> <p> W - geräuscharm </p> <p> W - vibrationsarm </p> <p> F - variabel (Holzart, -struktur, trockenes/nasses Holz, ...) </p> <p> W - Holzstam einfach besitzig </p>

Phase	Definition
Tätigkeit	Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme
Methode	gedankliche Abstraktion und Problemformulierung
mögl. Arbeitsergebnis	Liste von Hauptproblemen
erläuternde Hinweise	explizite Angabe von Kernproblemen, Formulierung offener Fragen
Beispiel	
<p>DFG 479 / 68 - 1 Konzeptpapier</p> <p>Blatt: A <u>A2/Ex/0200/0018</u></p> <p><i>Problem:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Glas ist hart, spröde - Glas muß der Anlage zugeführt werden - Glas muß zerbrochen / zermahlen werden - Glasgranulat muß aus der Anlage abgeführt werden <p><i>Nebenproblem:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - wie fein muß das Granulat sein? 	

Phase	Definition
Tätigkeit	Abstrahieren zum Erkennen der wesentlichen Probleme
Methode	systematische Erweiterung der Problemformulierung
mögl. Arbeitsergebnis	vom vorliegenden Konstruktionsauftrag abstrahierte (Teil-) Problemformulierung
erläuternde Hinweise	explizite, abstrakte, lösungsneutrale Problemformulierung

Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

KonzeptpapierBlatt: A2/Ox/0200/0059

Phase	Definition
Tätigkeit	Aufstellen von Funktionsstrukturen (Gesamtfunktion/ Teilfunktionen)
Methode	Aufgliedern in Teilfunktionen
mögl. Arbeitsergebnis	Liste wesentlicher Funktionen, Funktionsstruktur
erläuternde Hinweise	explizite Unterscheidung verschiedener Teilfunktionen

Beispiel

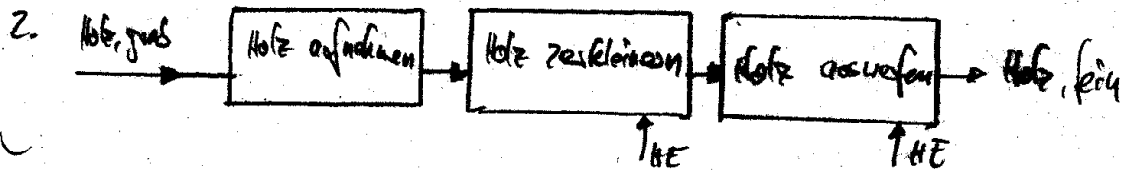
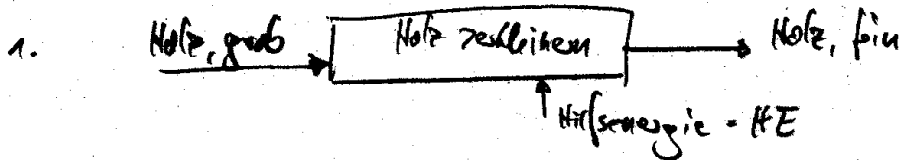
DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier

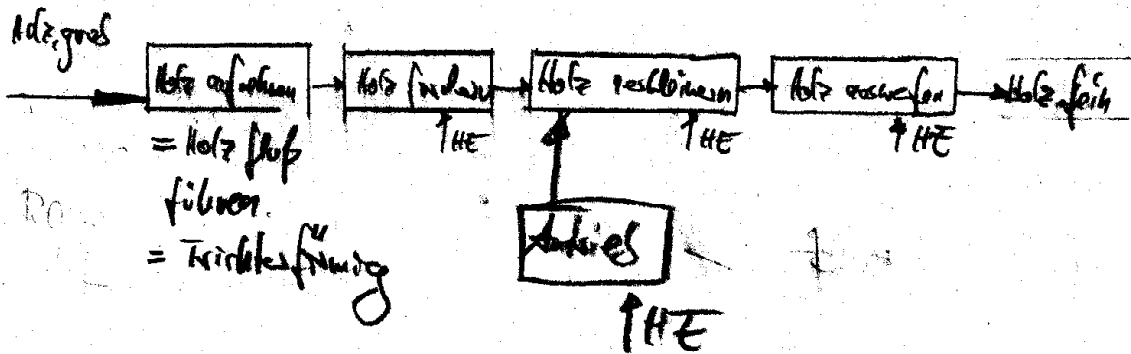
Blatt: 2

Funktionen

A3/Ox/0600/0093


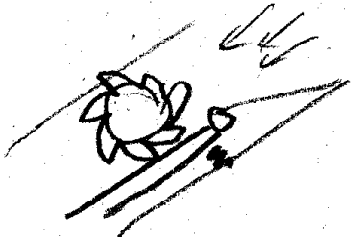
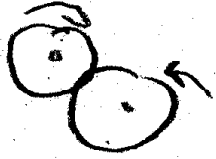
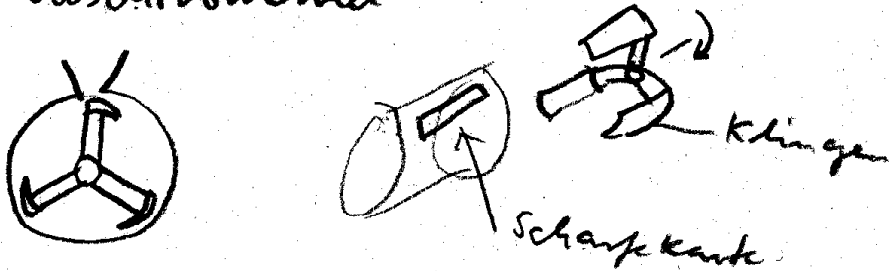


3. Aus Kostengründen: Förderung des Holzes überlaufstrecke



4. weitere Effekte:
 - Hacksaugwerk schützen (zu grobes Holz - Hände)

Phase	Kreation		
Tätigkeit	Suchen nach Wirkprinzipien für Teilfunktionen		
Methode	Analyse bekannter natürlicher und technischer Systeme		
mögl. Arbeitsergebnis	expliziter Bezug auf realisierte Lösungen		
erläuternde Hinweise	z.B. Analyse der manuellen Erfüllung der geforderten Hauptfunktion		
Beispiel			
<p>DFG 479 / 68 - 1 Konzeptpapier</p> <p>Blatt: A3/Ox/1000/0041</p>			
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p><u>Brain storming Zerklünerung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zerquetschen - Zerschneiden - Zerhacken - Reiben - Hobeln - Sägen - Zerschlagen </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p><u>Brain storming Einzug:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Greifarm - 1 Führungsrolle - 2 " - Schwerkraft - durch die Zerklünerung - </td> </tr> </table>		<p><u>Brain storming Zerklünerung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zerquetschen - Zerschneiden - Zerhacken - Reiben - Hobeln - Sägen - Zerschlagen 	<p><u>Brain storming Einzug:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Greifarm - 1 Führungsrolle - 2 " - Schwerkraft - durch die Zerklünerung -
<p><u>Brain storming Zerklünerung</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zerquetschen - Zerschneiden - Zerhacken - Reiben - Hobeln - Sägen - Zerschlagen 	<p><u>Brain storming Einzug:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Greifarm - 1 Führungsrolle - 2 " - Schwerkraft - durch die Zerklünerung - 		

Phase	Kreation
Tätigkeit	Suchen nach Wirkprinzipien für Teilfunktionen
Methode	Analogiebetrachtungen
mögl. Arbeitsergebnis	expliziter Bezug auf verwandte Lösungen
erläuternde Hinweise	explizite Nennung anderer Produkte/ Lösungen
<p>Beispiel</p> <p>DFG 479 / 68 - 1 Konzeptpapier</p> <p><u>Blatt: 4</u> <u>A3/Ox/0101/0097</u></p> <p>Häckselpinzipien</p> <p>a) "Rasenmäher"</p>  <p>b) Messerwalzen mit Platte</p>  <p>c) gegenläufige Messerwalzen</p>  <p>d) "Waschtrommel"</p>  <p>Scharfkante Klingen</p>	

Phase	Kreation
Tätigkeit	Suchen nach Wirkprinzipien für Teilfunktionen
Methode	systematische Untersuchung des physikalischen Zusammenhangs
mögl. Arbeitsergebnis	Angabe von Materialeigenschaften, auslegungsrelevanten physikalischen Merkmalen
erläuternde Hinweise	z.B. Materialeigenschaften der zu trennenden Stoffe, mechanische Modelle

Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier**Blatt:**

③

A3/Lx/0600/0092trennen:

Verband aufheben →

$$\sigma > \sigma_{\max, \text{zul}}$$

$$\tau > \tau_{\max, \text{zul}}$$

Erhöhung der
Spannung im
Papier

Verringerung der zulässigen
Spannung, bzw. Zugkraft
z.B. durch perforieren, oder
Hitze → örtliches Verbrennen → Lasen
oder vielleicht befeuchten.
Dann Zugkraft erzeugen.

Schubspannung

Wasserstrahl

↓
Abschneiden

Phase	Kreation
Tätigkeit	Suchen nach Wirkprinzipien für Teilfunktionen
Methode	Ordnungsschemata
mögl. Arbeitsergebnis	(geordnete) Liste von Wirkprinzipien
erläuternde Hinweise	klassifizierende Auflistung von Wirkprinzipien vor der Kombination zu Gesamtlösungen

Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier

Blatt:

A2/Lx/0200/0019

Allgemeine Konzepte für die Aufgabe Lsg

1.	Schneiden mit Messer / Schneiden mit Laser
2.	Schneiden mit Wasser / Schneiden mit Hitze Führung über Rollen / Führung mittels aufsteckender Greifer
3.	Messen über Bildverarbeitungssystem / Messen über mittels einer Bandge- schwindigkeit
I.	Führung d. Papiers über Rollen / Übergabe des Papiers an Greifer
II.	Anforderungen an den Ausgang werden von Stapelmaschine gegeben.

Phase	Kreation
Tätigkeit	Wirkprinzipien zu prinzipiellen Lösungsvarianten/ Wirkstruktur kombinieren
Methode	systematische Kombination
mögl. Arbeitsergebnis	Ordnungsschemata, morphologischer Kasten
erläuternde Hinweise	ggf. auch rein textlich dokumentierte systematische Kombination

Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier

Blatt:

A3/Ox/1000/0041

Morphologische Kasten

	1	2	3	4
translat. Materialb.				
U-Form	2	3	2	2
U-Form	Eigen gerichtet		keine: Wanne / Trichter mit Anschlag	
U-Form		0		
U-Form	Schneidbewegung: rotatorisch	Kreissäge		Kettensäge
U-Form	2	4	4	2
U-Form	wiederkehrend			
U-Form	Zerquetschen			
U-Form	3			
U-Form	Schneidbewegung: translatorisch	Stichsäge	Hobel	Beil
U-Form	1	3	3	3
U-Form	Hammer			
U-Form	1			

Phase	Kreation
Tätigkeit	Lösungsvarianten darstellen (Skizzieren/ Grobgestalten)
Methode	intuitive Verbesserung durch Skizzen
mögl. Arbeitsergebnis	Prinzipskizzen, grobmaßstäbliche Entwurfsskizzen, ggf. mit Erläuterungen
erläuternde Hinweise	Skizzen, die vor Darstellung von Gesamtlösungen der Klärung von Teilfragen dienen

Beispiel

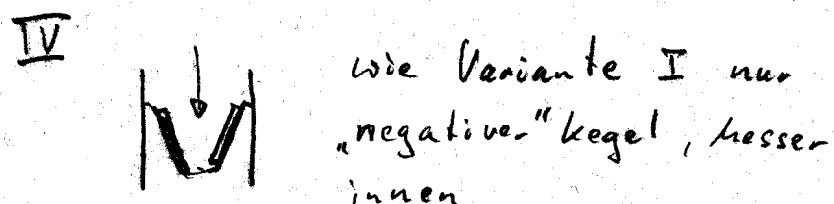
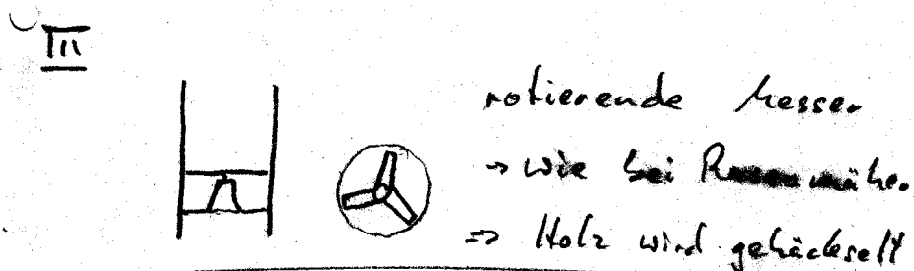
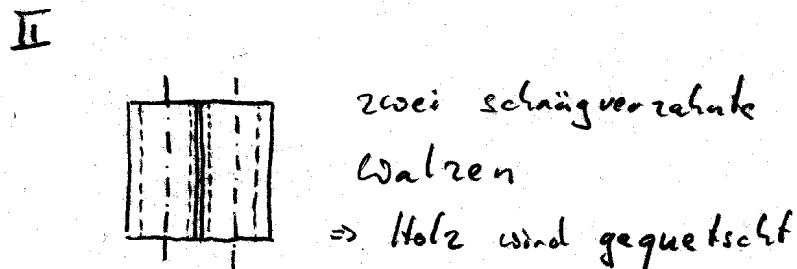
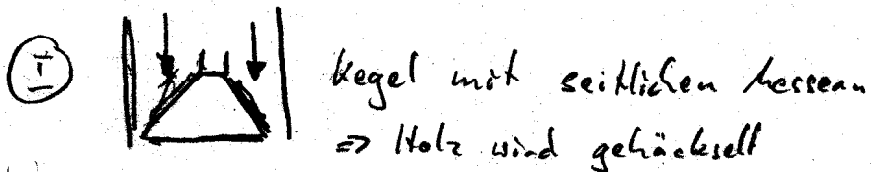
DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier

Blatt: 3

A2/Ox/0600/0020

Grundkonzepte



Phase	Kreation
Tätigkeit	Lösungsvarianten darstellen (Skizzieren/ Grobgestalten)
Methode	vereinfachte Dimensionierung
mögl. Arbeitsergebnis	Abschätzung, Berechnung
erläuternde Hinweise	explizite Nennung von Abmessungen, Kräften, Momenten, ...
Beispiel	

Phase	Kreation
Tätigkeit	Lösungsvarianten vorläufig beurteilen und auswählen
Methode	Auswahlliste
mögl. Arbeitsergebnis	Rangfolge der Güte/ Wertprofile/ verbal formulierte Schlussfolgerungen
erläuternde Hinweise	explizite Nennung von Auswahlkriterien im Zusammenhang mit der Lösungskonkretisierung

Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier

Blatt: ①

A3/Lx/1000/0081

① Ideen

- A) parallele Schneiden, die hydraulisch bewegt werden
- B) — " — / die mech. bewegt werden
- C) Schneide die quer zur Papierbahn bewegt wird
- D) dünner, schnell umlaufender Draht, der senkrecht zum Papier läuft und quer zur Bahn verfahren wird (Bandsäge)
- E) Kreissäge die quer zur Papierbahn bewegt wird

② Bewertung

- A) - hydraulisch ist aufwendig, aber hohe Kräfte sind möglich (gut für große Stapel geeignet)
- hydraulik träge/langsam
- B) - mechanisch können Klingen schnell bewegt werden → hohe Schnittfrequ.
- Antrieb kann leicht mit Vortrieb kombiniert werden (Ketten, Zahnräder, Exzenter/Nocken)
- C) - Schneide kann schnell bewegt werden
- Antrieb mit Vortrieb synchronisierbar

Phase	Kreation
Tätigkeit	Lösungsvarianten konkretisieren/ überarbeiten
Methode	Skizzieren
mögl. Arbeitsergebnis	Prinzipskizzen der Gesamtlösung, grobmaßstäbliche Entwurfsskizzen
erläuternde Hinweise	Skizzen der Gesamtlösung

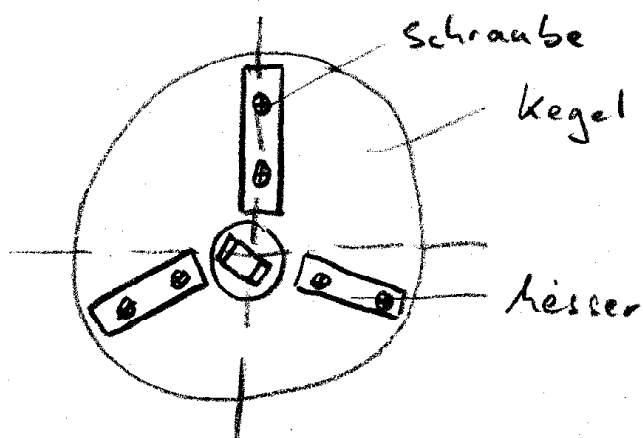
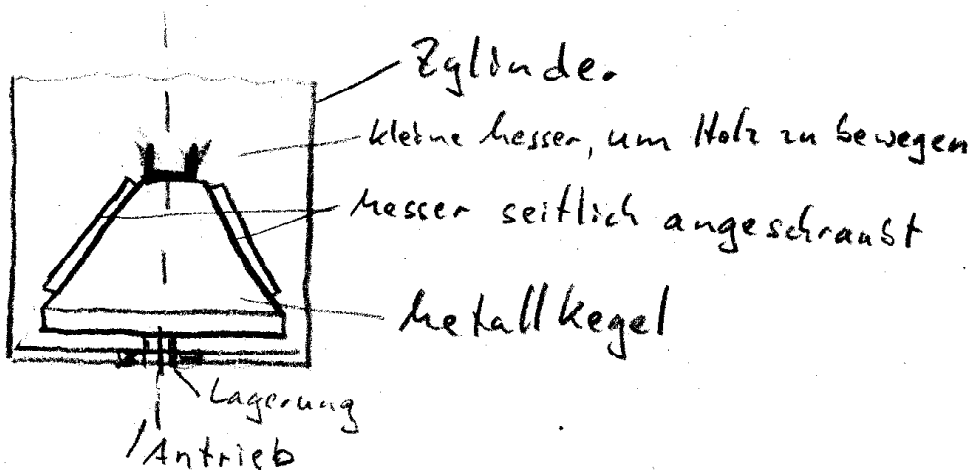
Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

Konzeptpapier

Blatt: 4

A2/Ox/0600/0020

Ausar Seitung Variante I

Phase	Kreation
Tätigkeit	Lösungsvarianten konkretisieren/ überarbeiten
Methode	Funktion verbal beschreiben
mögl. Arbeitsergebnis	verbale Beschreibungen der Lösungsvarianten
erläuternde Hinweise	ausführliche Beschreibung der Lösungsvarianten, ggf. im Zusammenhang mit Skizzen

Beispiel

DFG 479 / 68 - 1

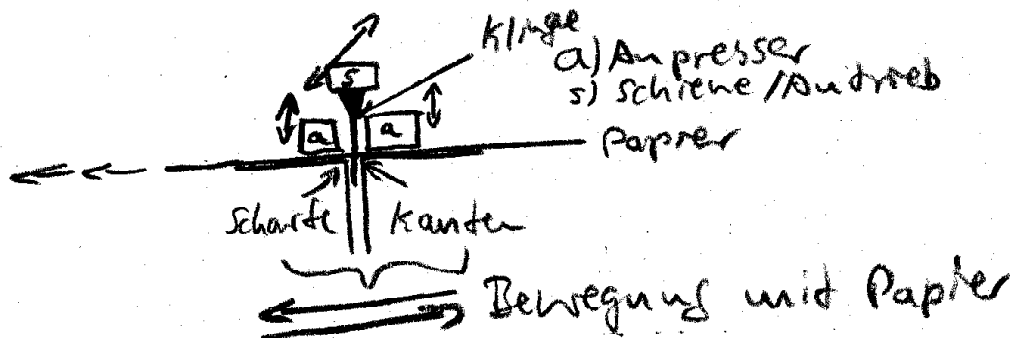
Konzeptpapier**Blatt: 6****A3/Lx/1000/0081**

Weiter im Text

Details zu Var. C)

- doppelseitige, steife Klinge
wird schnell quer zum
Papier bewegt

- Anpresser vor und hinter der
Schneide



8.2.2 Kodierungsleitfaden für die Vorentwurfsphase

Der Kodierungsleitfaden für die Vorentwurfsphase folgt dem Aufbau der zur Vorgehensanalyse eingesetzten Vorgehensmatrix (vgl. Abbildung 4-14, S. 146)

	Aufgabe klären	Aufgabenstellung nachvollziehen	<ul style="list-style-type: none"> – Anforderungen, Probleme, offene Fragen explizit im Tätigkeitsprotokoll oder auf Konzeptblatt genannt
	Konzipieren	Wirkstruktur / Prinzipskizze nachvollziehen	<ul style="list-style-type: none"> – explizit im Protokoll oder auf Konzeptblatt erkennbar – Begriffe: Prinzip, Funktionsprinzip, Wirkungsweise – eigene Prinzipskizzen zu Funktionsweise/ Energiefluss
Entwerfen	Grobgestalten (überwiegend Konzeptpapier)	Erkennen gestaltungsbestimmender Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> – explizit im Protokoll oder auf Konzeptblatt erkennbar – weitere eigene Anforderungen genannt – Begriffe: Anforderung, Forderung, Bedingungen, ...
		Klären der räumlichen Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> – Maßangaben auf Konzeptskizzen – Umrisslinien, Mittellinien maßstabsgetreu
		Strukturieren in gestaltungsbestimmende Hauptfunktionsträger	<ul style="list-style-type: none"> – explizite Benennung beider Baugruppen in einem Zeitintervall (Konzeptpapier oder Protokoll) – explizit Schnittstellen identifiziert, definiert, gestaltet (nur im Entstehungskontext beurteilbar)
		Grobgestalten der gestaltungsbestimmenden Hauptfunktionsträger	<ul style="list-style-type: none"> – nicht notwendigerweise maßstabsgetreue Geometrieerzeugung
		Auswählen geeigneter Entwürfe	<ul style="list-style-type: none"> – explizit erkennbare Gestaltungsvarianten, von denen nur eine weiterverfolgt wird – explizit im Text genannt im Zusammenhang mit Entwurfskizzen – Begriffe: „Prüfen“, „Ändern“, „falsche Lösung“, ... im Zusammenhang mit Entwurfskizzen
	Feingestalten (Zeichenblatt)	Suchen von Lösungen für Nebenfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> – Nebenfunktionen: Dichten, Einstellen, Hilfskräfte erzeugen, Gefährdungen vermindern/ ausschließen, ... – z.B. Suchen nach geeigneter Bauform von Verbindungs- oder Dichtungselementen
		Feingestalten der Haupt- und Nebenfunktionsträger	<ul style="list-style-type: none"> – Reinzeichnung auf Zeichenblatt, in der Regel ohne vollständige Ausführung von Schraffuren, Bemaßungen etc.
		Bewerten nach techn. und wirtschaftl. Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> – explizit im Protokoll genannt – auf Konzeptpapier explizit durchgeführt
	Vervollständigen und Kontrollieren	optimierendes und abschließendes Gestalten	<ul style="list-style-type: none"> – Hinzufügen von Verbindungselementen, Dichtungselementen, Wälzlagern etc., die vorher gar nicht oder nur als Umriss vorhanden waren – Begriffe „Korrigieren“, „Ändern“ im Protokoll im Zusammenhang mit Reinzeichnung
		Kontrollieren auf Fehler	<ul style="list-style-type: none"> – im Zusammenhang mit Vervollständigen & Kontrollieren, abgrenzen gegen „Auswählen geeigneter Entwürfe“! – explizit im Text genannt – optimierende Korrekturen an schon vorhandenen Gestaltungszonen explizit erkennbar
		Vervollständigen	<ul style="list-style-type: none"> – Schraffur, Bemaßung, Stückliste, Oberflächenangaben, Passungsangaben, Schriftfeld, ...

9 Literatur

ADELSON 1989

Adelson, B.: Cognitive Research: Uncovering How Designers Design; Cognitive Modeling: Explaining and Predicting How Designers Design. In: Research in Engineering Design, Vol. 1, No. 1 (1989), S. 35-42.

ADKI 1967

VDI-Fachgruppe Konstruktion (ADKI): Enpaß Konstruktion. In: Konstruktion, Nr. 19 (1967), S. 192-195.

AHMED 2000

Ahmed, S.: Understanding the Use and Reuse of Experience in Engineering Design. Diss. Cambridge 2000.

AKIN 1979

Akin, Ö.: Exploration of the Design Process. In: Design Methods and Theories, Vol. 13, No. 3/4 (1979), S. 115-119.

ANDERSON 1983

Anderson, J. R.: The Architecture of Cognition. Cambridge (Mass.) 1983.

ANDERSON 2001

Anderson, J. R.: Kognitive Psychologie. Heidelberg, 3. Aufl. 2001.

ANDREASEN 1987

Andreasen, M. M.: Design Strategy. In: Eder, W. E. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 87, Vol. 1, S. 171-178.

ARCHER 1971

Archer, B.: Technology Innovation: A Methodology. Frimley 1971.

ASIMOV 1962

Asimov, M.: Introduction to Design. Prentice Hall 1962.

BADDELEY 1986

Baddeley, A. D.: Working Memory. Oxford 1986.

BANSE 2000

Banse, G.: Konstruieren im Spannungsfeld: Kunst, Wissenschaft oder beides? In: Banse, G.; Friedrich, K. (Hg): Konstruieren zwischen Kunst und Wissenschaft. Idee - Entwurf - Gestaltung. Berlin 2000, S. 19-79.

BANSE & FRIEDRICH 2000

Banse, G.; Friedrich, K. (Hg): Konstruieren zwischen Kunst und Wissenschaft. Idee - Entwurf - Gestaltung. Berlin 2000.

BARROWS 1980

Barrows, H. S.: Problem-based Learning. An Approach to Medical Education. London 1980.

BAYA 1996

Baya, V.: Information Handling Behavior of Designers During Conceptual Design. Three Experiments. Diss. Stanford University, Palo Alto 1996.

BAYA & LEIFER 1996

Baya, V.; Leifer, L. J.: Understanding Information Management in Conceptual Design. In: Cross, N.; Christiaans, H.; Dorst, K. (Hg): Analysing Design Activity. Chichester 1996, S. 151-168.

BEITZ 1990

Beitz, W.: Konstruktionsleitsystem als Integrationshilfe. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI Berichte 812 (1990), S. 181-201.

BEITZ ET AL. 1992

Beitz, W.; Birkhofer, H.; Pahl, G.: Konstruktionsmethodik in der Praxis, In: Konstruktion, Nr. 44 (1992), S. 391-397.

BEITZ & HELBIG 1997

Beitz, W.; Helbig, D.: Neue Wege zur Produktentwicklung. Berufsfähigkeit und Weiterbildung. Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Technische Universität Berlin 1997.

BEITZ ET AL. 1997A

Beitz, W.; Hacker, W.; Timpe, K.-P.: Design methodology: Lernability and effectiveness. Forschungsberichte Band 41, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie: Technische Universität Dresden 1997.

BEITZ ET AL. 1997B

Beitz, W.; Timpe, K.-P.; Hacker, W.; Rückert, C.; Gaedeke, O.; Schroda, F.: Konstruktionsarbeit studentischer Übungsgruppen. Empfehlungen für die konstruktionsmethodische Ausbildung an Technischen Universitäten. Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Technische Universität Berlin 1997.

BECKENBACH 1993

Beckenbach, N.: Sozial und Ingenieurwissenschaften. Zwei fremde Kulturen. In: Huber, J.; Thurn, G. (Hg): Wissenschaftsmilieus. Wissenschaftskontroversen und soziokulturelle Konflikte. Berlin 1993, S. 38-66.

BENDER 1999

Bender, Bernd: Conceptions for Purposive and Motivating Teaching and Learning in Engineering Design Courses. In: Dym, C. L. (Hg): Designing Design Education for the 21st Century. Proceedings of MUDD Design Workshop II, Claremont (CA) 1999, S. 15-20.

BENDER 2001

Bender, Bernd: Concepts for Purposive and Motivational Teaching and Learning in Engineering Design Courses. In: International Journal of Engineering Education, Vol. 17, Nos. 4 and 5 (2001), S. 336-341.

BENDER 2003

Bender, Bernd: Task Design and Task Analysis for Empirical Studies into Design Activity. In: Journal of Engineering Design, Vol. 14, No. 4 (2003), S. 399-408.

BENDER & BEITZ 1999

Bender, Bernd; Beitz, W.: New Learning/Teaching Conceptions in Engineering Design Education. Experiences Made at TU Berlin. In: Lindemann et al. (Hg): Communication and Cooperation of Practice and Science. Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 99, Vol. 2, S. 881-886.

BENDER & LONGMUEß 2003

Bender, Bernd, Longmuß, J.: Knowledge Management in Problem-Based Educational Engineering Design Courses. In: International Journal of Engineering Education, Vol. 19, No. 5 (2003), S. 706-711.

BENDER ET AL. 2001A

Bender, Bernd; Kammerer, U.; Pietzcker, F.; Blessing, L.T.M., Hacker, W.: A Systematic Approach to Observation, Analysis, and Categorisation of Design Heuristics. In: Culley, Steve et al. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 01: Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling, S.197-204.

BENDER ET AL. 2001B

Bender, Bernd; Kammerer, U.; Pietzcker, F.; Blessing, L.T.M., Hacker, W.: Successful Strategies for Complex Design in Early Phases of the Product Development Process, An Empirical Study. In: Culley, Steve et al. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 01: Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling, S. 173-180.

BENDER ET AL. 2002A

Bender, Bernd; Reinicke, T.; Wünsche, T.; Blessing, L. T. M.: Application of Methods from Social Sciences in Design Research. In: Marjanovic, D. (Hg): Proceedings of the 7th International Design Conference DESIGN 2002, Vol. 1, S. 7-16.

BENDER ET AL. 2002B

Bender, Bernd; Kammerer, U.; Pietzcker, F.; Blessing, L.T.M.; Hacker, W.: Task Design and Task Analysis for Empirical Studies into Design Activity. In: Marjanovic, D. (Hg): Proceedings of the 7th International Design Conference DESIGN 2002, Vol. 1, S. 119-124.

BENDER ET AL. 2002C

Bender, Bernd; Kammerer, U.; Pietzcker, F.; Blessing, L.T.M.; Hacker, W.: A Software Tool for Observation and Analysis of Design Activity. In: Marjanovic, Dorian (Hg): Proceedings of the 7th International Design Conference DESIGN 2002, Vol. 1, S. 113-118.

BENDER, (BEATE) 2001

Bender Beate: Zielorientiertes Kooperationsmanagement in der Produktentwicklung. München 2000.

<http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/mw/2001/bender.html>

BENDER, (BEATE) & LONGMUIß 1999

Bender, Beate; Longmuß, J.: Projekttraining für Studierende. In: Das Hochschulwesen, Nr. 3 (1999), S. 85-89.

BENDER, (BEATE) ET AL. 2001

Bender, Beate; Bender, Bernd; Blessing, L.T.M.: How Missions Determine the Characteristics of Product Development Methodologies. In: Culley, Steve et al. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 01: Design Management. Process and Information Issues, S. 313-320.

BESSANT & MCMAHON 1979

Bessant, J. R., McMahon, B. J.: Participant Observation of a Major Design Decision in Industry. In: Design Studies, Vol. 1, No. 1 (1979), S. 21-26.

BISCHOFF & HANSEN 1953

Bischoff, W., Hansen, F.: Rationelles Konstruieren. Berlin (Ost) 1953.

BLESSING 1991

Blessing, L. T. M.: The Design Process of a Complex Product: Selected Results and Analysis. In: Hubka, V. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 91, Vol. 1, S. 342-350.

BLESSING 1994

Blessing, L. T. M.: A Process-Based Approach to Computer-Supported Engineering Design. Diss. University of Twente, Enschede 1994.

BLESSING 1995

Blessing, L. T. M.: Comparison of Design Models Proposed in Prescriptive Literature. In: Proceedings of the COST A3 / COST A4 International Research Workshop, Lyon 2.-3. Feb. 1995, S. 187-212.

BLESSING ET AL. 1998

Blessing, L.T.M.; Chakrabarti, A.; Wallace, K.M.: An Overview of Descriptive Studies in Relation to a General Design Research Methodology. In: Frankenberger, E. et al. (Hg.): Designers - The Key to Successful Product Development. London 1998, S. 42-56.

BORTZ & DÖRING 2002

Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Berlin, 3. Aufl. 2002.

BORTZ & LIENERT 1998

Bortz, J.; Lienert, G. A.: Kurzgefaßte Statistik für die klinische Forschung. Ein Leitfaden für die Analyse kleiner Stichproben. Berlin, 1998.

BROADBENT 1958

Broadbent, D. E.: Perception and Communication. London 1958.

CARROLL ET AL. 1980

Carroll, J. M. et al.: Aspects of Solution Structure in Design Problem Solving. In: American Journal of Psychology, Vol. 93, No. 2, 1980, S. 269-284.

CORMIER & HAGMAN 1987

Cormier, S.; Hagman, J. (Hg): Transfer of Learning. Contemporary Research and Applications. San Diego & London 1987.

CHRISTIAANS & DORST 1992

Christiaans, H.; Dorst, K.: An Empirical Study into Design Thinking. In: Cross, N.; Dorst, K.; Roozenburg, N. F. M. (Hg): Research in Design Thinking. Proceedings of a Workshop Meeting at Delft University of Technology, Delft 1992, S. 119-125.

CHRISTIAANS & VENSELAAR 1992

Christiaans, H.; Venselaar, K.: Practical Implications of a Knowledge-Based Design Approach. In: Cross, N.; Dorst, K.; Roozenburg, N. F. M. (Hg): Research in Design Thinking. Proceedings of a Workshop Meeting at Delft University of Technology, Delft 1992, S. 111-118.

CROSS 1984

Cross, N. (Hg): Developments in Design Methodology. Chichester 1984.

CROSS 1990

Cross, N.: The Nature and Nurture of Design. In: Design Studies, Vol. 11, No. 3 (1990), S. 127-140.

CROSS ET AL. 1992

Cross, N.; Dorst, K.; Roozenburg, N. F. M. (Hg): Research in Design Thinking. Proceedings of a Workshop Meeting at Delft University of Technology, Delft 1992.

CROSS ET AL. 1996

Cross, N.; Christiaans, H.; Dorst, K. (Hg): Analysing Design Activity. Chichester, New York 1996.

CROSS ET AL. 1996A

Cross, N.; Christiaans, H.; Dorst, K.: Introduction: The Delft Protocol Workshop. In: Cross, N.; Christiaans, H.; Dorst, K. (Hg): Analysing Design Activity. Chichester 1996, S. 1-16.

CROSS & CROSS 1996

Cross, N.; Cross, A. C.: Observations of Teamwork and Social Processes in Design. In: Cross, N.; Christiaans, H.; Dorst, K. (Hg): Analysing Design Activity. Chichester 1996., S. 291-317.

CROSS & CROSS 1998

Cross, N.; Cross, A. C.: Expertise in Engineering Design. In: Research in Engineering Design, Vol. 10, 1998, S. 141-149.

CURTIS ET AL. 1988

Curtis, B.; Krasner, H.; Iscoe, N.: A Field Study of the Software Design Process for Large Systems. In: Communications of the ACM, Vol. 31, No. 11 (1988), S. 1268-1287.

DÖRNER 1974

Dörner, D.: Die kognitive Organisation beim Problemlösen. Versuche zu einer kybernetischen Theorie der elementaren Informationsverarbeitungsprozesse beim Denken. Bern 1974.

DÖRNER 1976

Dörner, D.: Problemlösen als Informationsverarbeitung. Stuttgart 1976 (weitere Auflagen 1979, 1987).

DÖRNER ET AL. 1983

Dörner, D.; Kreuzig, H. W.; Reither, F.; Stäudel, T.: Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität. Bern 1983.

DÖRNER 1989

Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek 1989 (weitere Auflagen bis 2003).

DWARAKANATH 1996

Dwaranakath, S.: Understanding and Supporting Decision Making in Engineering Design. Diss. University of Cambridge 1996.

DYLLA 1991

Dylla, Norbert: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren, München 1991.

EASTMAN 1968

Eastman, C.M.: Explorations of the Cognitive Processes in Design. Diss. Carnegie Mellon University, Pittsburgh (PA) 1968.

EASTMAN 1970

Eastman, C. M.: On the Analysis of Intuitive Design Processes. In: Moore, G. (Hg): Emerging Methods in Environmental Design. Cambridge (MA) 1970, S. 21-37.

EISENTRAUT & GÜNTHER 1997

Eisentraut, R.; Günther, J.: Individual Styles of Problem Solving and their Relations to Representations of the Design Process. In: Design Studies, Vol. 18 (1997), S. 369-383.

EHRENSPIEL 1995

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Methoden für Prozeßorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München 1995.

EHRENSPIEL 2003

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München, 2. Aufl. 2003.

EHRENSPIEL & RUTZ 1987

Ehrlenspiel, K., Rutz, A.: Konstruieren als gedanklicher Prozeß. In: Konstruktion 39 (1987), S. 409-414

EHRENSPIEL & DYLLA 1991

Ehrlenspiel, K.; Dylla, N.: Untersuchung des individuellen Vorgehens beim Konstruieren. In: Konstruktion Nr. 43 (1991), S. 43-51.

EHRENSPIEL & DYLLA 1993

Ehrlenspiel, K., Dylla, N.: Experimental Investigations of Designers' Thinking Methods and Design Procedures. In: Journal of Engineering Design, Vol. 4, No. 3 (1993), S. 201-212.

FELDHUSEN 1989

Feldhusen, J.: Systemkonzept für die durchgängige und flexible Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses. Berlin 1989.

FEYERABEND 1975

Feyerabend, P.: Against Methods. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge. London 1975. (deutsch: Wider den Methodenzwang, Frankfurt am Main 1976)

FRANKE 1985

Franke, H.-J.: Konstruktionsmethodik und Konstruktionspraxis - eine kritische Betrachtung. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 85, Vol. 2, S. 910-924.

FRANKENBERGER 1997

Frankenberger, E.: Arbeitsteilige Produktentwicklung - Empirische Untersuchungen und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion. Düsseldorf 1997.

FRANKENBERGER ET AL. 1998

Frankenberger, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H. (Hg): Designers - The Key to Successful Product Development. London 1998.

FRENCH 1971

French, M. J.: Engineering Design. The Conceptual Stage. London 1971.

FRENCH 1985

French, M. J.: Conceptual Design for Engineers. London, Berlin, Heidelberg, 2. Aufl. 1985.

FRICKE 1993

Fricke, G.: Konstruieren als flexibler Problemlöseprozess - Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren. Düsseldorf 1993.

FRICKE 1996

Fricke, G.: Successful Individual Approaches in Engineering Design. In: Research in Engineering Design, Vol. 8 (1996), S. 151-165.

GEUPEL 1996

Geupel, H.: Konstruktionslehre. Methodisches Konstruieren für das praxisnahe Studium. Berlin 1996.

GILL 1990

Gill, H.: Adoption of Design Science by Industry – Why so slow? *Journal of Engineering Design*, Vol. 1, No. 3 (1990), S. 289-95.

GOEL & PIROLI 1992

Goel, V.; Pirolli, P.: The Structure of Design Problem Spaces. In: *Cognitive Science*, Vol. 16 (1992), S. 395-429.

DE GRAAFF & KOLMOS 2003

de Graaff, E.; Kolmos, A.: Characteristics of Problem-Based Learning. In: *International Journal of Engineering Education*, Vol. 19, No. 5 (2003), S. 657-661.

DE GRAAFF ET AL. 2003

de Graaff, E.; Kolmos, A.; Fruchter, R. (Hg): Problem Based Learning. Special Issue of the *International Journal of Engineering Education*, Vol. 19, No. 5 (2003).

GRABOWSKI ET AL. 1998A

Grabowski, H.; Rude, S.; Grein, S. (Hg): *Universal Design Theory*. Aachen 1998.

GRABOWSKI ET AL. 1998B

Grabowski, H.; Rude, S.; Grein, S.; Meis, E.; El-Mejbri, E.: Universal Design Theory, Elements and Applicability to Computers. In: Grabowski, H.; Rude, S.; Grein, S. (Hg): *Universal Design Theory*. Aachen 1998, S. 209-220.

GRIES 2002

Gries, B.: Zur Problematik rechnergestützter Konstruktionsleitsysteme. In: *Proceedings 13. Symposium Design for X*, Neukirchen 2002.

GÖKER 1996

Göker, H. M.: Einbinden von Erfahrung in das konstruktionsmethodische Vorgehen. Düsseldorf 1996.

GÜNTHER 1998

Günther, J.: Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess - Eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis. Aachen 1998.

GÜNTHER & EHRENSPIEL 1998

Günther, J.; Ehrlenspiel, K.: How do designers from practise design? In: Frankenberger, E. et al. (Hg.): *Designers - The Key to Successful Product Development*, London 1998, S. 85-97.

GUINDON 1990

Guindon, R.: Designing the Design Process. Exploiting Opportunistic Thoughts. In: *Human-Computer Interaction*, Vol. 5 (1990), S. 305-344.

HACKER 1989

Hacker, W.: On the utility of procedural rules. In: Ergonomics, Vol. 32, No. 7 (1989), S. 717-732.

HACKER 1992

Hacker, W.: Expertenkönnen. Göttingen 1992.

HACKER 1998A

Hacker, W.: Arbeitspsychologie. Bern 1998.

HACKER 1998B

Hacker, W.: Mental control of goal-directed activity. In: FEPSAC-Proceedings 1998, Vol. 1, S. 104-122.

HACKER 1999

Hacker, W.: Konstruktives Entwickeln als Tätigkeit – Versuch einer Reinterpretation des Entwurfsdenkens (design problem solving). In: Zeitschrift für Sprache & Kognition, Nr. 18(3/4) (1999), S. 88-97.

HACKER & MEINEL 1978

Hacker, W.; Meinel, M.: Kognitive Komponenten beim Erlernen interner Repräsentationen: Sind behaltensökonomische Repräsentationen stets regulativ zweckmäßig? In: Clauß, G.; Guthke, J.; Lehwald, G. (Hg.): Psychologie und Psychodiagnostik lernaktiven Verhaltens. Tagungsbericht 1978.

HALES 1987(1991)

Hales, C.: Analysis of the Engineering Design Process in an Industrial Context. Diss. Cambridge University 1987 (2. Aufl. 1991).

HANSEN 1956

Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Berlin (Ost) 1956.

HANSEN 1965

Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Berlin (Ost) 2. Aufl. 1965.

HANSEN 1974

Hansen, F.: Konstruktionswissenschaft. Grundlagen und Methoden. München 1974.

HART & STAVELAND 1988

Hart, S.G.; Staveland, L.E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock, P.A.; Meshkati, N. (Hg): Human Mental Workload. Amsterdam 1988, S. 139-183.

HAYES-ROTH & HAYES-ROTH 1979

Hayes-Roth, B.; Hayes-Roth, F.: A Cognitive Model of Planning. In: Cognitive Science, Vol. 3 (1979), S. 275-310.

HÖHNE ET AL. 1997

Höhne, G.; Sperlich, H.; Krause, W.; Sommerfeld, E.: Untersuchung des Modalitätenwechsels zwischen Bild und Begriff an ausgewählten Konstruktionsaufgaben, In: Werkstattgespräch Bild und Begriff IV, Braunschweig 1997.

HOFFMANN 1993

Hoffmann, J.: Unbewusstes Lernen – eine besondere Lernform? In: Psychologische Rundschau, Nr. 44 (1993), S. 75-89.

HUBIG ET AL. 2000

Hubig, C.; Huning, A.; Ropohl, G.: Nachdenken über Technik. Die Klassiker der Technikphilosophie. Berlin 2000.

HUBKA 1973

Hubka, V.: Theorie der Maschinensysteme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin 1973.

HUBKA 1976

Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse. Analyse der Konstruktionstätigkeit. Berlin 1976.

HUBKA 1980

Hubka, V.: Allgemeines Vorgehensmodell des Konstruierens. Zürich 1980 (auch als: Principles of Engineering Design. London 1982)

HUBKA 1984

Hubka, V.: Theorie technischer Systeme. Berlin 1984. (auch als: Hubka, V., Eder, W. E.: Theory of Technical Systems. A Total Concept Theory for Engineering Design. Berlin 1988.)

HUBKA & EDER 1992

Hubka, V., Eder, W. E.: Einführung in die Konstruktionswissenschaft. Übersicht, Modell, Anleitung. Berlin 1992.

JORDEN 1983

Jorden, W.: Die Diskrepanz zwischen Konstruktionspraxis und Konstruktionsmethodik. In: Hubka, V.; Andreasen, M. M. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 83, Vol. 2, S. 487-494.

JORDEN ET AL. 1985

Jorden, W.; Havenstein, G.; Schwarzkopf, W.: Vergleich von Konstruktionswissenschaft und Praxis, Teilergebnisse eines Forschungsvorhabens. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 85, Vol. 2, S. 957-966.

KESSELRING 1954

Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre. Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewußtem Schaffen. Berlin 1954.

KOLB 1984

Kolb, D. A.: *Experiential Learning. Experience as the Source of Learning and Development.* Englewood Cliffs (N.J.) 1984.

KOLLER 1976

Koller, R.: *Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte- und Apparatebau.* Berlin 1976.

KOLLER 1985

Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen, Arbeitsschritte, Prinzplösungen.* Berlin 1985 (weitere Auflagen 1994, 1998)

KRAUSE ET AL. 1998

Krause, F.-L.; Kind, C.; Heimann, R.: *Software-Repository for Universal Application within the Development Process of Artefacts.* In: Grabowski, H.; Rude, S.; Grein, S. (Hg): *Universal Design Theory.* Aachen 1998, S. 237-246.

KRAUSE ET AL. 1997

Krause, W.; Schack, B.; Gibbons, H.; Kriese, B.: *Über die Unterscheidbarkeit begrifflicher und bildhaft-anschaulicher Repräsentationen bei elementaren Denkanforderungen.* In: *Zeitschrift für Psychologie*, Nr. 205 (1997), S. 169-203.

KRAUSE ET AL. 1999

Krause, W.; Seidel, G.; Heinrich, F.; Sommerfeld, E.: *Multimodale Repräsentation als Basiskomponente kreativen Denkens.* In: Zimmermann, B.; Heinrich, F. (Hg): *Kreativität.* Jena 1999.

KUFFNER & ULLMAN 1991

Kuffner, T.; Ullman, D.G.: *The information requests of mechanical design engineers.* In: *Design Studies*, Vol. 12, No. 1 (1991), S. 42-51.

KUHN 1962

Kuhn, Thomas S.: *The Structure of Scientific Revolutions.* Chicago 1962.

LANGNER 1991

Langner, T.: *Analyse von Einflussfaktoren beim rechnerunterstützten Konstruieren.* Berlin 1991.

LEYER 1981

Leyer, A. (1981): *Konstruktion erneut zur Diskussion gestellt.* In: *Konstruktion*, Nr. 33 (1981), S. 45-48.

LIENERT & RAATZ 1998

Lienert, Gustav A.; Raatz, U.: *Testaufbau und Testanalyse.* Weinheim, 6. Aufl. 1998.

LIPPARDT 2000

Lippardt, S.: *Gezielte Förderung der Kreativität durch bildliche Produktmodelle.* Düsseldorf 2000.

LONGMUIß 1998

Longmuß, J.: Projektarbeit in der Konstruktionsausbildung. Organisation und Bewertung. Düsseldorf 1998.

LONGMUIß 2003

Longmuß, J.: Der Referenz-Prozess – eine Leitlinie für den gesamten Produktentstehungsprozess. In: Konstruktion, Nr. 9 (2003), S. 64-67.

LONGMUIß ET AL. 1995

Longmuß, J.; Salein, M.; Beitz, W.; Mertens, H.: Projektorientierte Gruppenarbeit in der Konstruktionsausbildung – ein erfolgreicher Ansatz. In: Konstruktion, Nr. 47 (1995), S. 409-415.

LUER & SPADA 1992

Lüer, G.; Spada, H.: Denken und Problemlösen. In: Spada, H. (Hg): Lehrbuch allgemeine Psychologie. Bern, 2. Aufl. 1992, S. 189-280.

MALHOTRA ET AL. 1980

Malhorta, A.; Thomas, J. C.; Carroll, J. M.; Miller, L. A. (1980): Cognitive Processes in Design. In: International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 12 (1980), S. 119-140.

MARPLES 1961

Marples, D. L.: The Decisions of Engineering Design. In: IRE Transactions on Engineering Management. EM-8, June 1961, S. 55-71.

MILLER ET AL. 1960

Miller, G. A.; Galanter, E.; Pribham, K. H.: Plans and the structure of behavior. New York 1960.

MINNEMAN 1991

Minneman, S. L.: The Social Construction of a Technical Reality. Empirical Studies of Group Engineering Design Practice. Diss. Stanford University, Palo Alto 1991.

MÜLLER 1970

Müller, J.: Grundlagen der systematischen Heuristik. Berlin (Ost) 1970.

MÜLLER 1985

Müller, J.: Denkpsychologie und Ingenieurmethodik, Wege zur empirisch fundierten Methodikforschung. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 85, Vol. 2, S. 841-854.

MÜLLER 1988

Müller, J.: Wo steht die Konstruktionsmethodik? Bestandsaufnahme und Orientierung. In: Konstruktion, Nr. 40 (1988), S. 317-323.

MÜLLER 1990

Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Systematik, Heuristik, Kreativität. Berlin 1990.

MÜLLER 1991

Müller, J.: Akzeptanzbarrieren als berechtigte und ernst zu nehmende Notwehr kreativer Konstrukteure, Nicht immer nur böser Wille, Denkrägheit oder alter Zopf. In: Hubka, V. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 91, Vol. 2, S. 769-776.

NEWELL 1970

Newell, A.: Heuristic Programming: Ill-structured Problems. In: Arnofsky, J. (Hg.): Progress in Operations Research, New York 1970, S. 363-414.

NEWELL 1980

Newell, A.: Reasoning, Problem Solving, and Decision Processes, The Problem Space as a Fundamental Category. In: Nickerson, R. S. (Hg): Attention and Performance VIII. Hillsdale 1980, S. 693-718.

NEWELL & SIMON 1958

Newell, A.; Simon, H. A.: Heuristic Problem-Solving, The next Advance in Operations Research. In: Operations Research, Vol. 1 (1958), S. 1-10.

NEWELL & SIMON 1972

Newell, A.; Simon, H. A. (1972): Human Problem Solving. Englewood Cliffs (N.J.) 1972.

NILSSON 1971

Nilsson, N. J.: Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence. Boston 1971.

PACHE ET AL. 2001

Pache, M.; Römer, A.; Lindemann, U.; Hacker, W.: Sketching Behaviour and Creativity in Conceptual Engineering Design, In: Culley, S. et al. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 01: Design Research. Theories, Methodologies, and Product Modelling, S. 461-468.

PAHL 1985

Pahl, G.: Denkpsychologische Erkenntnisse und Folgerungen für die Konstruktionslehre. In: (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 85, Vol. 2, S. 817-832.

PAHL 1990

Pahl, G.: Notwendigkeit und Grenzen der Konstruktionsmethodik. In: Hubka, V.; Kostelic, A. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 90, Vol. 1, S. 15-30.

PAHL 1994

Pahl, G.: Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Köln 1994.

PAHL 1996

Pahl, G.: Buchbesprechungen. In: Konstruktion 48 (1996), S. 356.

PAHL & BEELICH 1981

Pahl, G.; Beelich, K. H.: Lagebericht, Erfahrungen mit dem methodischen Konstruieren. In: Werkstatt und Betrieb, Nr. 11 (1981), S.773-782.

PAHL & BEITZ 1977

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin, 1. Aufl. 1977.

PAHL & BEITZ 1984

Pahl, G.; Beitz, W.: Engineering Design. A Systematic Approach. London, 1. Aufl. 1984.

PAHL & BEITZ 1996

Pahl, G.; Beitz, W.: Engineering Design. A Systematic Approach. London, 2. Aufl. 1996.

PAHL & BEITZ 1997

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin, 4. Aufl. 1997.

PAHL & BEITZ ET AL. 2003

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl / Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Berlin, 5. Aufl. 2003.

PARNAS & CLEMENTS 1986

Parnas, D.; Clements, P. C.: A Rational Design Process: How and Why to Fake it. In: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. SE-12, No. 2 (1986), S. 251-257.

PERRIG 1990

Perrig, W.J.: Implizites Wissen. Eine Herausforderung für die Kognitionspsychologie. In: Schweizerische Zeitschrift für Psychologie, Nr. 49 (1990), S. 234-249.

PERRIG 1996

Perrig, W.J.: Implizites Lernen. In: Hoffmann, J.; Kintsch, W. (Hg.): Lernen, Enzyklopädie der Psychologie. Göttingen 1996, Bd. 4, S. 203-234.

PERRIG & PERRIG 1993

Perrig, W.J.; Perrig, P.: Implizites Gedächtnis: unwillkürlich, entwicklungsresistent und altersunabhängig. In: Zeitschrift für Entwicklungspsychologie, Nr. 25 (1993), S. 29-47.

PIETZCKER 2004

Pietzcker, F.: Dissertation TU Dresden, Allgemeine Psychologie (in Bearbeitung).

PIETZCKER ET AL. 2002

Pietzcker, F.; Bender, Bernd; Kammerer, U.: Ist Konstruieren gleich Problemlösen oder: sind gute Problemlöser gute Konstrukteure? In: TeaP 2002, Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Chemnitz 2002.

RAMSTRÖM & RHENMAN 1965

Ramström, D.; Rhenman, E.: A Method of Describing the Development of an Engineering Project. In: IEEE Transactions on Engineering Management. Vol. EM-12, No. 3 (1965), S. 79-86.

REITMAN 1964

Reitman, W. R.: Heuristic Decision Procedures, Open Constraints and Structure of Ill-defined Problems. In: Shelley, M. W. (Hg): Human Judgement and Optimality. Chichester, New York 1964, S. 282-315.

REITMAN 1965

Reitman, W. R.: Cognition and Thought. Chichester, New York 1965.

RIEHM 1983

Riehm, U. (1983): Einige konzeptuelle Mängel der Konstruktionswissenschaft und ihre Auswirkungen auf CAD. In: Hubka, V.; Andreasen, M. M. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 83, Vol. 1, S. 314-326.

REULEAUX 1875

Reuleaux, F.: Lehrbuch der Kinematik. Bd. 1: Theoretische Kinematik. Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens. Braunschweig 1875.

REULEAUX 1900

Reuleaux, F.: Lehrbuch der Kinematik. Bd. 2: Die praktischen Beziehungen zu Geometrie und Mechanik. Braunschweig 1900.

REULEAUX & MOLL 1854

Reuleaux, F.; Moll, C.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Braunschweig 1854.

RITTEL 1972

Rittel, H. W. J.: Second Generation Design Methods (Interview), DMG 5th Anniversary Report 1972, Reprint In: Cross, N. (Hg): Developments in Design Methodology. Chichester 1984, S. 317-327.

RITTEL & WEBBER 1973

Rittel, H. W. J.; Webber, M. M.: Planning Problems are Wicked Problems. Originally published as part of 'Dilemmas in a General Theory of Planning'. In: Policy Sciences, Vol. 4 (1973), S. 155-169. Reprint In: Cross, N. (Hg): Developments in Design Methodology. Chichester 1984, S. 135-144.

RÖMER 2002

Römer, A.: Unterstützung des Design Problem Solving: Einsatz und Nutzen einfacher externer Hilfsmittel in den frühen Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses. Diss. TU Dresden 2002.

RÖMER ET AL. 2001

Römer, A.; Weißhahn, G.; Hacker, W.: Effort-saving product representations in design – results of a questionnaire survey. In: Design Studies, Vol. 22, No. 6 (2001), S. 473-491.

RODENACKER 1970

Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren. Berlin 1970 (weitere Auflagen 1976, 1984, 1991).

ROPOHL 1983

Ropohl, G.: Konstruktionswissenschaft und Allgemeine Techniklehre. In: Hubka, V.; Andreasen, M. M. (Hg): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 83, Vol.1, S. 327-336.

ROTH 1968

Roth, K.: Gliederung und Rahmen einer neuen Maschinen-Geräte-Konstruktionslehre. In: Feinwerktechnik, Nr. 72 (1968), S. 521-528.

ROTH 1970

Roth, K.: Systematik der Maschinen und ihrer elementaren Funktionen, In: Feinwerktechnik, Nr. 74 (1970), S. 453-460.

ROTH 1982

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin 1982.

ROTH 2000

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. Berlin 2000.

ROTH ET AL. 1971

Roth, K.; Franke, H.-J.; Simonek, R.: Algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen. In: Feinwerktechnik, Nr. 75 (1971), S. 337-345.

RÜCKERT 1997

Rückert, C.: Untersuchungen zur Konstruktionsmethodik – Ausbildung und Anwendung. Düsseldorf 1997.

RÜCKERT ET AL. 1997

Rückert, C.; Ahrens, G.; Schroda, F.; Gaedeke, O.: Evaluating Methodical Engineering Design Education. In: Proceedings ASME International Conference on Design Theory and Methodology 1997, Paper No. DTM-97-3889.

RÜCKERT ET AL. 1997A

Rückert, C.; Giesa, H.-G.; Schroda, F.; Bender, Beate: Categorizing Engineering Design Problems. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 97, Vol. 2, S. 441-444.

RÜCKERT ET AL. 1997B

Rückert, C.; Schroda, F.; Gaedeke, O.: Wirksamkeit und Erlernbarkeit der Konstruktionsmethodik. In: Konstruktion, Nr.49 (1997), S. 26-31.

RÜCKERT ET AL. 1998

Rückert, C.; Gaedeke, O.; Schroda, F.; Riemer, S.: Konstruktionsarbeit studentischer Übungsgruppen. Empfehlungen für die konstruktionsmethodische Ausbildung. In: VDI-Z, 1/2 (1998)

RÜCKERT ET AL. 1998A

Rückert, C.; Tegel, O.; Schroda, F.: Learnability and Effectivity of Mechanical Engineering Design Methodology. In: Proceedings IDPT 1998, Austin/TX, Society for Design and Process Science, Vol. 3, S. 110-117.

RUTZ 1985

Rutz, A.: Konstruieren als gedanklicher Prozeß. München 1985.

SACHSE 1999

Sachse, P.: Unterstützung des entwerfenden Problemlösens im Konstruktionsprozess durch Prototyping. In: Sachse, P.; Specker, A. (Hg): Design Thinking. Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten. Zürich 1999, S. 68-145.

SACHSE & SPECKER 1999

Sachse, P.; Specker, A.: Design Thinking – Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten. Zürich 1999.

SCHREGENBERGER 1981

Schregenberger, J. W.: Methodenbewußtes Problemlösen. Ein Beitrag zur Ausbildung von Konstrukteuren. Bern 1981.

SCHREGENBERGER 1985

Schregenberger, J. W.: Neue Impulse für die Konstruktionsmethodik. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 85, Vol. 2, S. 893-898.

SCHRODA 2000

Schroda, F., "Über das Ende wird am Anfang entschieden" – Zur Analyse der Anforderungen von Konstruktionsaufträgen", Diss. TU Berlin 2000
http://edocs.tu-berlin.de/diss/2000/schroda_frauke.htm

SIMON 1973

Simon, H. A.: The Structure of Ill Structured Problems. In: Artificial Intelligence, Vol. 4 (1973), S. 181-201.

SPADA 1992

Spada, H. (Hg): Lehrbuch allgemeine Psychologie. Bern, 2. Aufl. 1992.

STAUFFER 1989

Stauffer, L. A.: The Commonality of Design in Diverse Domains. In: Proceedings of the International conference on Engineering Design ICED 89, S. 447-466.

STAUFFER ET AL. 1987

Stauffer, L.A.; Ullman, D.G.; Dietterich, T.G.: Protocol Analysis of Mechanical Engineering Design. In: Hubka, V. (Hg.): Proceedings of the International conference on Engineering Design ICED 87, WDK Schriftenreihe 13, Vol. 1, S. 74-85.

STAUFFER & ULLMAN 1988

Stauffer, L.A.; Ullman, D.G.: A Comparison of the Results of Empirical Studies into the Mechanical Design Process. In: Design Studies, Vol. 9, No. 2 (1988), S. 107-114.

STAUFFER & ULLMAN 1991

Stauffer, L.A.; Ullman, D.G.: Fundamental Processes of Mechanical Designers based on Empirical Data. In: Journal of Engineering, Vol. 2, No.1 (1991), S. 89-101.

STÄUDEL 1988

Stäudel, T.: Der Kompetenzfragebogen – Überprüfung eines Verfahrens zur Erfassung der Selbsteinschätzung der heuristischen Kompetenz, belastenden Emotionen und Verhaltenstendenzen beim Lösen komplexer Probleme. In: Diagnostica, Nr. 34/2 (1988), S. 136-148.

STEUER 1968

Steuer, K.: Theorie des Konstruierens in der Ingenieurausbildung. Leipzig 1968.

SUH 1990

Suh, N. P.: The Principles of Design. Oxford 1990.

TAKEDA ET AL. 1990

Takeda, H.; Hamada, S.; Tomiyama, T.; Yoshikawa, H.: A Cognitive Approach to the Analysis of Design Processes. In: Proceedings of DTM'90, Chicago, S. 153-160.

TANG 1991

Tang, J. C.: Findings from Observational Studies of Collaborative Work. In: International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 34, No. 2 (1991), S. 143-160.

TANG & LEIFER 1989

Tang, J.C.; Leifer, L.J.: An Observational Methodology for Studying Group Design Activity. In: Research in Engineering Design, Vol. 2, No. 4 (1991), S. 209-219.

TEGEL 1996

Tegel, O.: Methodische Unterstützung beim Aufbau von Produktentwicklungsprozessen. Diss. TU Berlin 1996.

THOMAS & CARROLL 1979

Thomas, J.C.; Carroll, J.M.: The Psychological Study of Design. In: Design Studies, Vol.1, No. 1 (1979), S. 5-11.

ULLMAN & DIETTERICH 1987

Ullman, D.G.; Dietterich, T.G.: Mechanical Design Methodology: Implications on Future Developments of CAD and KB Systems. In: Engineering with Computers, Vol. 2, No.1 (1987), S. 21-29.

ULLMAN ET AL. 1988

Ullman, D.G.; Dietterich, T.G.; Stauffer, L.A.: A model of the mechanical design process based on empirical data. In: Artificial Intelligence in Engineering Design and Manufacturing, Vol. 2 (1988), S. 33 – 52.

VDI 2221 (1986)

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. 1. Ausg. Düsseldorf 1986.

VDI 2221 (1993)

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. 2. Ausg. Düsseldorf 1993.

VDI 2222 (1973)

VDI-Richtlinie 2222 (Entwurf), Konzipieren technischer Produkte. Düsseldorf 1973.

VDI 2222 (1977)

VDI-Richtlinie 2222, Konzipieren technischer Produkte. Düsseldorf 1977.

VDI 2225 (1964)

VDI-Richtlinie 2225 (1964) Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. 1. Ausg. Düsseldorf 1964.

VDI 2225 (1977)

VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. 3. Ausg. Düsseldorf 1977.

VISSER 1990

Visser, W.: More or Less Following a Plan During Design: Opportunistic Deviations in Specification. In: International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 33, No. 3 (1990), S. 247-278.

VISSER 1994

Visser, W.: Organisation of Design Activities: Opportunistic with hierarchical Episodes. In: Interacting with Computers, Vol. 6, No. 3 (1994), S. 235-274.

VISSER 1995

Visser, W.: Reuse of Knowledge: Empirical Studies. In: Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1010 (1995), S. 335-346.

VISSER 1996

Visser, W.: Use of Episodic Knowledge and Information in Design Problem Solving. In: Cross, N.; Christiaans, H.; Dorst, K. (Hg): Analysing Design Activity. Chichester 1996, S. 271-289.

WALDRON ET AL. 1987

Waldron, M. B.; Jelinek, W.; Ownes, D.; Waldron, K. J.: A Study of Visual Recall Differences between Expert and Naïve Mechanical Designers. In: Hubka, V. (Hg.): Proceedings of the International conference on Engineering Design ICED 87, WDK Schriftenreihe 13, Vol. 1, S. 86-93.

WALDRON & WALDRON 1988

Waldron, M. B.; Waldron, K. J.: A Time Sequence Study of a Complex Mechanical System Design. In: Design Studies, Vol. 9, No. 2 (1988), S. 95-106.

WALDRON 1989

Waldron, M. B.: Observations on Management of Initial Design Specifications in Mechanical Design. In: Hubka, V. (Hg.): Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 89, Schriftenreihe WDK 18, S. 189-200.

WALDRON & WALDRON 1996

Waldron, M. B., Waldron, K. J. (Hg): Mechanical Design. Theory & Methodology. Berlin 1996.

WALDRON & WALDRON 1996A

Waldron, M. B., Waldron, K. J.: The Influence of the Designer's Expertise on the Design Process. In: Waldron, M. B., Waldron, K. J. (Hg): Mechanical Design. Theory & Methodology. Berlin 1996, S. 5-20.

WALLACE & HALES 1987

Wallace, K. M.; Hales, C.: Detailed Analysis of an Engineering Design Project. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 87, Vol. 1, S. 94-101.

WALLACE 1992

Wallace, K. M.: Some Observations on Design Thinking. In: Cross, N.; Dorst, K.; Roozenburg, N. F. M. (Hg): Research in Design Thinking. Proceedings of a Workshop Meeting at Delft University of Technology, Delft 1992, S. 75-86.

V. D. WETH 1994

von der Weth, R.: Konstruieren: Heuristische Kompetenz, Erfahrung und individuelles Vorgehen. In: Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie, Nr. 3 (1994), S. 102-111.

V. D. WETH 2001

von der Weth, R.: Management der Komplexität – Ressourcenorientiertes Handeln in der Praxis. Bern 2001.

WETZSTEIN & HACKER 2002

Wetzstein, A.; Hacker, W.: Sprachgestützte Reflexion verbessert die Entwurfsergebnisse unabhängig von ihrer Entstehungsstrategie. In: Hacker, W. (Hg.): Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung der frühen Phasen. Zürich 2002, S. 143-153.

WÖGERBAUER 1943

Wögerbauer, H.: Die Technik des Konstruierens. München 1943.

YOSHIKAWA 1983

Yoshikawa, H.: Automation in Thinking in Design. Computer Applications in Production and Engineering. Amsterdam 1983.

ZWICKY 1966

Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. München 1966 (hier Taschenbuchausgabe München 1971).