

Forschungsberichte



Thomas Alink

**Bedeutung, Darstellung und Formulierung von
Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit
dem C&C-Ansatz**

Meaning and notation of function for solving design
problems with the C&C-Approach

Band 48

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

Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz

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

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas Alink
aus Freiburg

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Dezember 2010
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Korreferent: Dr. Claudia Eckert

Vorwort des Herausgebers

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

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

Albert Albers

Vorwort zu Band 48

Ferdinand Redtenbacher definierte in der Mitte des 19. Jahrhunderts als Professor an der damaligen Poly-technischen Hochschule Karlsruhe den Begriff der Konstruktion als ein gleichwertiges Zusammenspiel von wissenschaftlicher Methode und künstlerischem Handeln. Was Redtenbacher damit sagen wollte gilt auch heute noch. Die Konstruktion von technischen Systemen ist eine der komplexesten Aufgabenstellungen, die sich dem Menschen stellen. Es geht darum, Lösungen für Probleme der Gesellschaft zu „erdenken“. Dies ist eine der schwierigsten „Denkarbeiten“ für den Menschen, da komplexe Systeme mit vielfältigen unterschiedlichen Wechselwirkungen und Vernetzungen gestaltet werden. Gute Konstrukteure sind die gesuchtesten Fachleute in der Technik. Ihre Bedeutung für den Unternehmenserfolg wird leider oft unterschätzt. Prinz Philip brachte vor kurzem den Zusammenhang auf den Punkt. Er sagte, dass die erfolgreichen Konstrukteure (Inventors) die „Popstars der Technik“ seien und sie es verdient hätten, auch dem entsprechend in der Gesellschaft gefeiert zu werden. Dies ist sicherlich ein Wunsch, den man nur unterstützen kann. Die Herausforderung ist, den Prozess der Konstruktion, d. h. die Synthese von gestalteten Strukturen zur Erfüllung von bestimmten Funktionen zu verstehen und den Menschen in dieser Herausforderung dann durch geeignete Methoden, Werkzeuge und Prozesse zu helfen. Diesem Thema widmet sich die Konstruktionsforschung bereits seit vielen Jahrzehnten. Mit unterschiedlichen Methoden wird versucht, die komplexen Zusammenhänge des Konstruktionsprozesses zu verstehen. Allerdings zeigen auch neueste Untersuchungen, dass hier immer noch große Defizite vorliegen. Die in vielen Bereichen der Wissenschaft erarbeiteten Methoden und Hilfsmittel werden in der konstruktiven Praxis oftmals nicht angewendet. Sie gelten als zu sperrig, zu verkopft und nicht wirklich zielführend. Im IPEK versucht ein engagiertes Team junger Wissenschaftler unter meiner Leitung hier neue Wege zu gehen. So wird mit dem Contact & Channel-Ansatz eine Methodenbasis zur Verknüpfung des Funktions- und Gestaltzusammenhangs im konstruktiven Synthese-Prozess entwickelt. Gleichzeitig konnte durch die Auffassung von Entwicklungsaufgaben als „Problemlösungsprozess“ und der damit einhergehenden Unterstützung dieses Prozesses durch Problemlösungsmethodik „SPALTEN“ ein weiterer wichtiger Baustein für die Unterstützung der praktischen Entwicklungsarbeit bereitgestellt werden. In einer größeren Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten wurde dieses Theoriegebäude kontinuierlich validiert, erweitert und strukturiert. Eine der wichtigsten Fragestellungen und sicherlich auch eine der am meisten diskutierten Begriffe – man kann sogar sagen, auch missverstandenen Begriffe in diesem Zusammenhang – ist die Funktion. Da sich der C&C-Ansatz ganz maßgeblich mit dem Zusammenwirken von Funktion und Gestalt beschäftigt, war es unabdingbar, in

wissenschaftlichen Arbeiten grundlegende Zusammenhänge zu erforschen. Gleichzeitig war es nach zehn Jahren Grundlagenforschung am C&C-Ansatz notwendig, seine praktische Nutzung im Prozess der Konstruktion auch empirisch zu untersuchen. Diesen beiden herausfordernden Aufgabenstellungen hat sich Herr Dr.-Ing. Thomas Alink in seiner Dissertation gestellt. Er will, den Funktionsbegriff, der dem C&C-Ansatz zugrunde liegt, kritisch hinterfragen und diesen für das Lösen von Gestaltungsproblemen in der Konstruktion differenziert entwickeln. Dabei wird der Funktions-Gestaltzusammenhang vor dem Hintergrund der Literatur analysiert und gleichzeitig durch geeignete Untersuchungen in der praktischen Konstruktionstätigkeit verifiziert. Die Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zum ganzheitlichen Forschungsansatz für die integrierte Produktentwicklung der „Karlsruher Schule“ und wird auch in der internationalen Konstruktionswissenschaft wichtige Impulse geben.

Dezember 2010

Albert Albers

Kurzfassung

Ingenieure in der Produktentwicklung technischer Systeme arbeiten unterschiedlich und sind auch unterschiedlich erfolgreich. Produktentwicklung wird als Lösungsprozess für Gestaltungsprobleme angesehen, in dessen Mittelpunkt handelnde Ingenieure stehen. Die Gestaltung von Produkten ist ein komplexer Vorgang, der durch Unsicherheiten und Annahmen gekennzeichnet ist.

Konsequenz der empirischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit ist, dass Funktionen grundsätzlich als Beschreibung der Interaktion des betrachteten Systems mit Nachbarsystemen aufgefasst werden sollte. Des Weiteren wird in dieser Arbeit vorgeschlagen Funktion als ein Konzept zu betrachten, das sich aus der Bedeutung, der Darstellung und der Formulierung eben der Funktion zusammensetzt.

Beim Lösen von Gestaltungsproblemen werden unterschiedliche Aktivitäten durchgeführt, deren Reihenfolge und zeitliche Ausdehnung projektspezifisch sind. In dieser Arbeit wurden die unterschiedlichen Bedeutungen, Darstellungen und Formulierungen von Funktion den beobachteten, notwendigen und sinnvollen Aktivitäten zugeordnet.

Mit der Auffassung von Funktion als Interaktion werden für den C&C-Ansatz Funktion im Sinne von Zweck und Funktion im Sinne von erwartetem und tatsächlichem Verhalten beschrieben. Zusätzlich können Aktionen benachbarter Systeme als Funktion aufgefasst werden und als Wechselwirkung mit dem zu gestaltenden System beschrieben werden. Mit Hilfe den C&C-Ansatzes kann zwischen Funktion „Mittel zum Zweck“ unterschieden werden.

Für die Anwendung der hier differenziert entwickelten Bedeutungen, Darstellungen und Formulierungen von Funktion ist es jedoch nicht sinnvoll, explizit zwischen den unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion zu unterscheiden. Besser ist, die unterschiedlichen Funktionen mit konkreten Fragen zu adressieren, die entsprechend der angetroffenen Aktivitäten strukturiert sind. Diese Konsequenzen unterliegen jedoch einer weiteren Bedingung. Sie werden nur wirksam, wenn einige Grundregeln methodischen Vorgehens beachtet werden. Da die hier dargestellten Handlungsvorschläge heuristischer Natur sind, werden sie den Anwender sein Ziel in keinem Falle mit 100%iger Sicherheit erreichen lassen. Der Anwender wird immer aufgefordert sein, sich seine Position im Prozess bewusst zu machen und seine Handlungen unter Beachtung der hier vorgeschlagenen Handlungsvorschläge auszurichten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf der Auswertung von Projekten und einem Experiment im Anwendungsbereich *Lösen von Gestaltungsproblemen*.

Danksagung

Nach meiner Zeit am Institut für Produktentwicklung fühle ich mich bestens vorbereitet auf eine Tätigkeit in der Industrie. Diese Vorbereitung verdanke ich meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers. Er hat mich in einem ständigen „Ringkampf“ gefordert und damit laufend gefördert. Für diese harte Schule, die jedoch immer konstruktiv und sachlich war möchte ich mich herzlich bedanken.

Während meiner gesamten Zeit hatte ich das Glück eine Kooperation mit Dr. Claudia Eckert, Senior Lecturer an der Open University, Milton Keynes, UK aufzubauen und zu pflegen. Innerhalb dieser Kooperation wurde ein großer Teil der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Experimente und Untersuchungen durchgeführt. Dr. Claudia Eckert hat mit einem unglaublichen Eigeninteresse und einer forschungsmethodisch ausgezeichneten Fähigkeit Kritik zu üben ganz wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen. Vielen herzlichen Dank hierfür.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Henning danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und für die konstruktive Anleitung zum Ablegen der Promotionsprüfung.

Diese Arbeit konnte nur entstehen, da sie in einem kritischen, jedoch konstruktiven Umfeld täglich hinterfragt und diskutiert werden konnte. Für die vielen Anregungen und das Aufzeigen der Lücken und Denkrillen möchte ich den Kollegen der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und Entwicklungsmanagement des IPEK danken und jeden ermutigen sich immer wieder der Diskussion mit Kollegen zu stellen. Im weiteren Umfeld haben auch die Kollegen der anderen Forschungsgruppen des IPEK zur Entstehung der Arbeit beigetragen, indem sie ihre Erfahrungen auf anderen Fachgebieten mit Hilfe von Entwicklungsmethodik weiterentwickelten und mit mir diskutierten.

Sicherlich am schwierigsten am Erarbeiten und Verfassen der Arbeit war das Zusammenbringen mit dem Familienleben. Dieses fand zeitweise nicht statt. Ich danke ganz besonders meiner Freundin Franziska, aber auch Leon, Ida und Finn für die Unterstützung, das Vertrauen und die Geduld, die man mit mir aufbringen musste.

Thomas Alink

„In Aufstellung unserer Grundsätze sind wir strenger als in ihrer Befolgung“

Theodor Fontane

Dies gilt auch für Entwicklungsmethodik.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Problemstellung und initiale Ziele.....	3
1.3	Funktion im (Ingenieurs-) Alltag	5
1.4	Struktur der Arbeit.....	7
2	Stand der Forschung	8
2.1	Allgemeines Umfeld des Themas.....	8
2.1.1	Unterstützung des Konstruktionsprozesses.....	8
2.1.2	Systemtechnik, Systems Engineering und Systemtheorie	10
2.1.3	Einführung von Methoden in Unternehmen	13
2.2	Heuristisches Vorgehen für Gestaltungsprobleme	14
2.2.1	Charakteristik von Gestaltungsproblemen.....	15
2.2.2	Methoden zur Problemlösung	17
2.2.3	Vorgehen und Problemdarstellung	18
2.2.4	Merkmale erfolgreicher Vorgehensweisen	19
2.2.5	Abstraktion beim Lösen von Gestaltungsproblemen.....	20
2.3	Funktionen in der Konstruktionsmethodik.....	24
2.3.1	Verschiedene Auffassungen von Funktionen	24
2.3.2	Formulierung und Abstraktion von Funktion	26
2.3.3	Darstellung vieler Funktionen in Funktionsstrukturen	27
2.3.4	5-Kern-Konzepte Beschreibung zur Einordnung von Funktionen	29
2.3.5	Diskretisierung des Übergangs zwischen Funktion und Gestalt	33
2.3.6	Kritik an der Diskretisierung zwischen Zielen und Gestalt	42
2.3.7	Zwischenfazit	44
2.4	Contact and Channel Ansatz.....	46
2.4.1	Systematik des C&C-Ansatzes.....	46
2.4.2	C&C-M und C&C-Ansatz.....	48
2.4.3	C&C-M beim Lösen von Gestaltungsproblemen.....	51
2.4.4	Das Konzept von Funktion im C&C-Ansatz	55
2.5	Fazit zum Stand der Forschung	57
3	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	60
3.1	Funktion und Gestalt.....	60
3.2	Ablauf des Lösen von Gestaltungsproblemen	62
3.3	Ausrichtung an den Anwendern	63
4	Forschungsmethode für empirische Studien	66
4.1	Empirische Vorgehensweise	66

4.2	Methodenchronologie der vorliegenden Arbeit	68
4.2.1	Wichtigkeit von Funktionen aus Sicht der Methodenanwender	69
4.2.2	Fokussierung auf Funktionen in C&C-Ansatz	71
4.2.3	Studien unter Realbedingungen	71
4.2.4	Experiment unter Laborbedingungen	72
4.3	Datenaufbereitung und Aufwand	72
5	Verwendung von Funktionen in Projekten.....	74
5.1	Auswertungsschema und Beschreibung der Projekte	74
5.1.1	Datengrundlage und Vorgehen bei der Auswertung	75
5.1.2	Diplomarbeiten in Kooperation mit Industrieunternehmen	76
5.1.3	Schulung in Lösen technischer Gestaltungsprobleme	78
5.1.4	Entwicklungsprojekte mit dem C&C-Ansatz.....	81
5.1.5	Forschungswshops	82
5.2	Unterschiedliche Auffassungen von Funktion.....	84
5.2.1	Transformation von Flussgrößen.....	84
5.2.2	Funktion als Zustandsänderung	87
5.2.3	Funktion als passive Reaktion und in Bauteilbeschreibungen	89
5.2.4	Funktion als substantiviertes Verb ohne Zuordnung	91
5.2.5	Wie der Anwender (das Nachbarsystem) auf das System wirkt.....	93
5.2.6	Wofür das System benötigt wird.....	95
5.2.7	Funktionen für die Suche nach Lösungsprinzipien	96
5.2.8	Funktion in der täglichen Sprache	96
5.3	Einfluss der Vorgehensweise auf die Verwendung von Funktion	98
5.3.1	Ziel der Problemlösung	98
5.3.2	Durchgängige Verwendung des C&C-Ansatz in Analyse und Synthese	99
5.3.3	Tiefe der Analyse und wann beginnt die Lösungssuche	101
5.3.4	Analyse und Ideengenerierung.....	101
5.3.5	Übersicht behalten und Detailanalyse	102
5.4	Funktion und Gestalt zuordnen mit dem C&C-Ansatz	104
5.4.1	Darstellung der Funktion ohne Bezug zu WFP und LSS	104
5.4.2	Vernachlässigung der LSS.....	105
5.4.3	Einzelne WFP und die Verbindung zum zweiten WFP	105
5.4.4	Funktionslogische Fehler	107
5.4.5	Mehrdeutigkeit der Funktion.....	110
5.4.6	Unterschiedliche Abstraktionsgrade der Formulierungen	112
5.5	Unspezifische Faktoren im C&C-Ansatz	112
5.5.1	Vorbehalte gegenüber Methodenanwendung.....	112
5.5.2	Anleitung der C&C-Ansatz Anwendung.....	113

5.5.3	Abbruch der Methode aufgrund der Komplexität des Problems	113
6	Verwendung von Funktionen im Experiment	115
6.1	Beschreibung und Auswertungsschema	115
6.1.1	Beschreibung des technischen Systems	115
6.1.2	Beschreibung des Experimentes	117
6.1.3	Daten und Aufbereitung	120
6.1.4	Quantitative Auswertung aller 20 Datensätze	123
6.1.5	Detaillierte Analyse von acht Datensätzen	125
6.1.6	Typische Ergebnisse der Probanden	130
6.2	Unterschiedliche Auffassung von Funktion	132
6.2.1	Unterschiedliche Bedeutung und Darstellung von Funktion	132
6.2.2	Unterschiedliche Formulierungen von Funktionen	134
6.2.3	Quantität identifizierter Funktionen	137
6.2.4	Unterschiedliche Hierarchieebenen der Funktionsstrukturen	139
6.2.5	Vollständigkeit und Aufbau der Funktionsstrukturen	141
6.2.6	Anordnung der Funktionenbäume	142
6.3	Einfluss der Vorgehensweise auf die Verwendung von Funktion	144
6.3.1	Unterschiedliche Vorgehensweisen	144
6.3.2	Strukturierung von Funktionen	147
6.3.3	Funktionen und der Verlauf der Analyse	149
6.3.4	Zeitpunkt, zu dem ein System als verstanden gilt	152
6.4	Funktion und Gestalt zuordnen mit dem C&C-Ansatz	152
6.4.1	Darstellung von C&C-Modellen	152
6.4.2	Verständnis der Anwendung des C&C-M	154
6.4.3	Probleme bei der Anwendung des C&C-Ansatzes	156
6.5	Unspezifische Faktoren im C&C-Ansatz	156
6.5.1	Vorgehen im Sinne der klassischen Konstruktionsmethodik	156
6.5.2	Aufgeben der Systematik – Vorfixierung	157
7	Anforderungen für die Verwendung von Funktion im C&C-Ansatz	158
7.1	Unterschiedliche Auffassungen, unterschiedliche Aktivitäten	160
7.1.1	Konzept von Funktion	161
7.1.2	Bedeutungen von Funktion	161
7.1.3	Darstellung der Funktionen	163
7.1.4	Formulierung von Funktionen	164
7.1.5	Zusammenfassung - Funktion als Interaktion mit Nachbarsystemen	167
7.2	Verlauf der Problemlösung und Funktionen	168
7.2.1	Übersicht behalten und gezielt vertiefen (Systemtechnik)	168
7.2.2	Bedeutung und Ausmaß des Systemverständnisses	169

7.2.3	Gemeinsames Verständnis für das Problem	172
7.2.4	Aufgaben der Systematik	173
7.2.5	Suche nach Lösungen	175
7.2.6	Zusammenfassung - Aktivitäten und Konzept von Funktion	176
7.3	Funktion und Gestalt zuordnen mit dem C&C-Ansatz	179
7.3.1	Wechselseitige Interaktion in einem einzelnen WFP	179
7.3.2	Zusammenwirken von WFP und LSS als Funktion.....	180
7.3.3	Darstellung systemischer Zusammenhänge.....	183
7.3.4	Synthese – Lösungen suchen	187
7.3.5	Zusammenfassung – Grundsätze für den C&C-Ansatz	188
7.4	Unspezifische Faktoren im C&C-Ansatz	190
8	Handlungsempfehlungen.....	191
8.1	Zusammenspiel der unterschiedlichen Sichtweisen	192
8.2	Hypothesen, Maßnahmen, Fakten	195
9	Zusammenfassung	198
10	Literaturverzeichnis.....	201
11	Begriffe.....	208
12	Lebenslauf	210
Anhang	211

1 Einleitung

Gibt man 10 Ingenieuren die Aufgabe für ein Gestaltungsproblem¹ eine Lösung zu finden und geht davon aus, dass die Umgebungsbedingungen für alle gleich sind, so werden daraus 10 unterschiedliche Lösungen mit 10 unterschiedlichen Herangehensweisen entstehen.

In der Produktentwicklung geht es immer darum, für einen bestimmten Zweck eine Lösung zu finden, welche diesen oft auch als Funktion bezeichneten Zweck möglichst gut erfüllen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle Ingenieure unterschiedliche Vorstellungen, Denkweisen und Erfahrungen haben, die sie bei der Lösungssuche individuell beeinflussen. Sie haben unterschiedliche Vorstellungen und Auffassung vom Zweck und dem Verhalten des Systems, so dass sich eine jeweils unterschiedliche Perspektive auf das Gestaltungsproblem ergibt.

1.1 Ausgangssituation

Ausgangspunkt für diese Arbeit ist die Erkenntnis, dass Ingenieure in der Produktentwicklung technischer Systeme unterschiedlich arbeiten und auch unterschiedlich erfolgreich sind². Produktentwicklung wird als Lösungsprozess für Gestaltungsprobleme angesehen, in dessen Mittelpunkt handelnde Ingenieure stehen. Die Gestaltung von Produkten ist ein komplexer Vorgang, der durch Unsicherheiten und Annahmen gekennzeichnet ist. Dieser Vorgang kann nicht durch algorithmisches³ Vorgehen bewältigt werden, sondern bedingt eine heuristische⁴ Herangehensweise, die sowohl analytische Fähigkeiten als auch Kreativität erfordert.

Diskretisierung trotz nicht linearer Prozesse

In der Konstruktionsmethodik wird zwischen der geforderten Funktion und der zu generierenden Gestalt eine logische, explizit beschreibbare Beziehung aufgezeigt. Viele Ansätze unterteilen diese Beziehung zwischen den geforderten Funktionen und

¹ Als Gestaltungsproblem wird in dieser Arbeit eine Aufgabenstellung betrachtet, deren Ergebnis ein technisches System ist. Dieses technische System ist ein mechatronisches System. Das Gestaltungsproblem bezieht sich nicht nur auf das Gesamtsystem, sondern im Besonderen auch auf Teilsysteme, die durch neue Teilsysteme ersetzt oder optimiert werden. Siehe auch Abschnitt 2.2

² Vgl. (Jänsch, 2007) und (Bender, 2004)

³ Eine strenge, lückenlose Abfolge logischer Elementaroperationen, (Müller, 1990)

⁴ Handlungsempfehlungen, die das Ziel sicherer erreichen lassen, wenn nur begrenztes Wissen zum Vorgang zu Verfügung steht

der diese Funktionen erfüllende Gestalt und diskretisieren⁵ somit das als Kontinuum ausgefasste Feld zwischen Funktion und Gestalt. Hierbei entsteht zu jedem Zwischenschritt ein Modell⁶, das den entsprechenden Reifegrad des Produktes abbildet. Dies wird üblicherweise Abstraktionsgrad genannt.

Dem gegenüber steht der tatsächliche Verlauf eines Problemlösungsprozesses, der in aller Regel nicht kontinuierlich ist. Der Übergang zwischen den unterschiedlichen Abstraktionsstufen folgt keiner strengen Regel, sondern einer projektspezifischen, individuellen Abfolge⁷. Diese Abfolge besteht aus Schritten der Synthese, in denen Lösungen gesucht werden, aber auch aus Schritten der Analyse, in denen die gefundenen Lösungen bewertet werden. Das Umsetzen der neuen Lösungen hat Auswirkungen auf die a priori geforderten Funktionen, sodass sich während der Lösungssuche selbst weitere Funktionen ergeben. Es liegt sozusagen ein Henne-Ei-Problem⁸ für Funktion und Gestalt vor, dessen Lösung iterativ sein muss. Aus diesem Grund sind technische Projekte nie exakt planbar, sondern gekennzeichnet durch nicht absehbare, verborgene Risiken. Zwar gibt es auf einer übergeordneten Ebene Gemeinsamkeiten im Ablauf, jedoch ist auch auf der speziellen, individuellen Ebene eine methodische Unterstützung notwendig.

Mangelnde Methodenausrichtung an den Anwendern

Die Konstruktionsmethodik betrieb und betreibt großen Aufwand, um neue Methoden für die Produktentwicklung in der Industrie zu entwickeln und in den Entwicklungsprozessen zu verankern. Dennoch ist die Akzeptanz, Verbreitung und Durchdringung in der Industrie derzeit noch unzureichend⁹. Die empirische Erforschung der Abläufe und Vorgehensweisen von Produktentwicklern beim Lösen von Gestaltungsproblemen zeigt hier wichtige Ansatzpunkte auf, die unabhängig von der Methodenentwicklung an sich sind. Dies betrifft die Methodeneinführung und den Methodentransfer von den Forschungseinrichtungen hin zu den Anwendern. Selten sind es die Forscher selbst, die dafür sorgen, dass die Methoden während der wissenschaftlichen Arbeit an einer Forschungseinrichtung offensiv in die Industrie getragen werden. Dies resultiert in einer mangelnden Ausrichtung der Methoden an den Bedürfnissen der Anwender, da die Methoden dann nur sehr punktuell durch den in der Industrie selbst tätig werdenden Forscher transferiert werden.

⁵ Unter Diskretisierung wird die Zerlegung in kleine Abschnitte bzw. einzelne Punkte verstanden.

⁶ Dies wird im Stand der Forschung Abschnitt 2.3.5 vertieft diskutiert.

⁷ (Albers, 2010)

⁸ Hierdurch wird die Frage: „Was war zuerst da: die Henne oder das Ei?“ beantwortet. Da das eine das andere bedingt, kann keine Aussage über den Zeitpunkt des Entstehens gemacht werden

⁹ (Geis, et al., 2008)

Das Erlernen von Methoden ist grundsätzlich aufwendig¹⁰, d. h. die Anwender müssen einen zusätzlichen Aufwand in Kauf nehmen, um eventuell zu einem späteren Zeitpunkt von der Methodenanwendung zu profitieren. Gemessen wird der Erfolg der Produktentwicklung jedoch immer am Umsatz des Produktes. Trägt der Einsatz einer Methode also nicht unmittelbar zum Projekt bei, besteht zunächst kein Anreiz die Methode zu erlernen. Aus diesem Grunde ist es wichtig, die Methoden unter Berücksichtigung der realen Abläufe zu entwickeln.

Die Arbeit ist so strukturiert, dass die Ergebnisse der durchgeführten empirischen Studien direkt in die Methodenentwicklung einfließen können.

1.2 Problemstellung und initiale Ziele

Der Contact and Channel-Ansatz¹¹(C&C-A) wurde entwickelt, um das Lösen von Gestaltungsproblemen methodisch zu unterstützen. Der C&C-A ist ein Mittel, um systematisch Funktion auf der Gestalt abzubilden. Ziel von ALBERS ET AL¹² war und ist es die klassischerweise auf die Beschreibung der Gestalt fokussierte methodische Unterstützung abstrakteren funktionalen Beschreibungen zugänglich zu machen. So zeigten sich zu Beginn der Arbeiten am C&C-A vor allem auch in der Maschinenkonstruktionslehre positive Auswirkungen der C&C-A Anwendung auf die Arbeitsweise der ausgebildeten Studierenden¹³.

Abbildung 1 zeigt ein C&C-Modell einer Getriebewelle und verdeutlicht, dass C&C-A Beschreibungen unterschiedlicher Abstraktionsgrade zur Erklärung der Funktion einer Getriebestufe verwendet werden können. Einerseits wird die Funktion textuell erklärt, andererseits werden Flüsse von Energie, Material und Information verwendet, um die Funktion zu verdeutlichen. Mit Wirkflächenpaaren (WFP) und Leitstützstrukturen (LSS) können diese funktionalen Beschreibungen auf die Darstellungen der Gestalt bezogen werden.

Der Autor dieser Arbeit ist seit Januar 2006 Mitglied der Forschergruppe um ALBERS und setzte sich die Weiterentwicklung des C&C-Ansatzes zur Aufgabe seiner wissenschaftlichen Arbeit. Von Beginn an war es Ziel hierbei den C&C-Ansatz in der Praxis der Produktentwicklung anzuwenden, zu bewerten und weiterzuentwickeln.

¹⁰ (Müller, 1990)

¹¹ Diese Benennung des bisher als Contact and Channel Modell (C&C-M) bezeichneten Ansatzes ist auch Ergebnis dieser Arbeit. Die Bezeichnung als C&C-Ansatz wird jedoch von diesem Abschnitt vorliegenden Arbeit an umgesetzt. Das Modell eines technischen Systems, das mit dem C&C-Ansatz gebildet wird, wird als C&C-Modell bezeichnet.

¹² (Albers, et al., 1999b)

¹³ (Albers, et al., 2003) und (Albers, et al., 2003b)

So wurde der C&C-Ansatz in unterschiedlichen Projekten angewendet, um Gestaltungsprobleme zu lösen und auf diese Weise Handlungsfelder für die Weiterentwicklung zu identifizieren. Aus der begleitenden, qualitativen Auswertung der durchgeführten Projekte wurden beispielsweise Anleitungen¹⁴ zum Aufbau von C&C-Modellen technischer Systeme erstellt, die das Erlernen erleichtern.

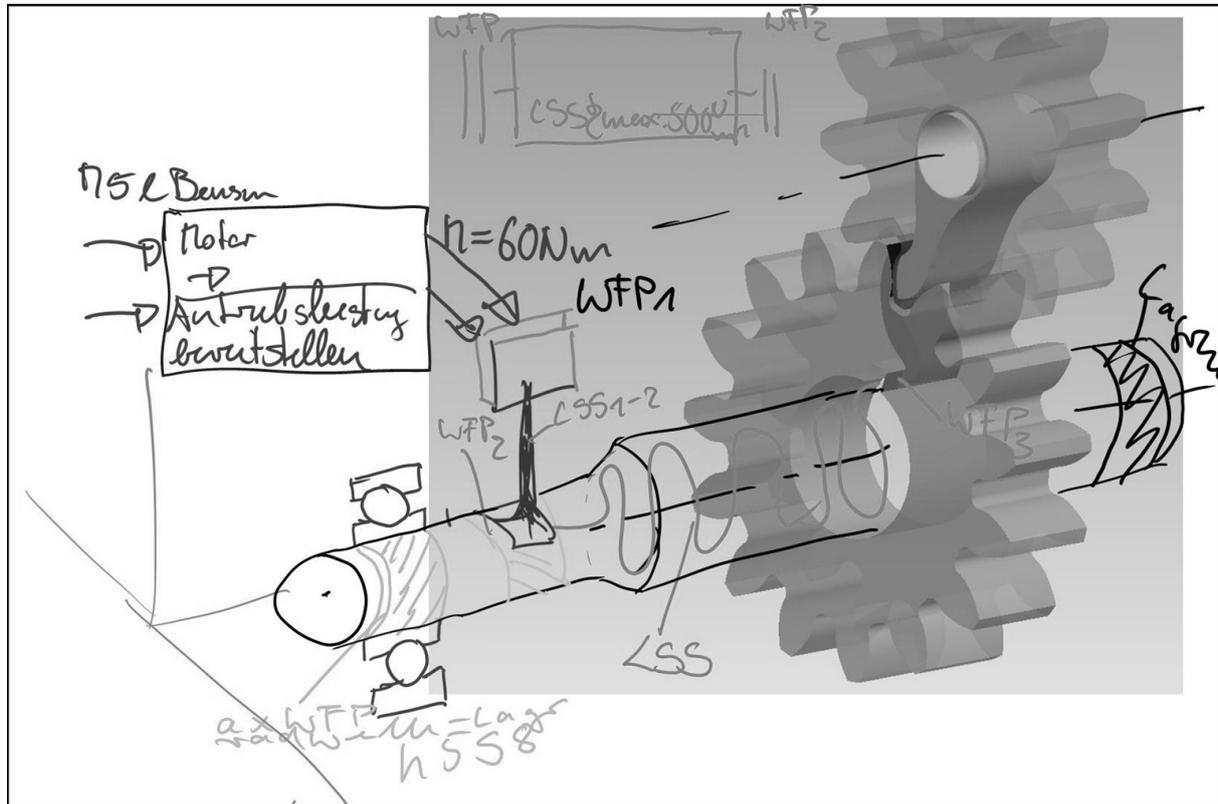


Abbildung 1: Unterschiedliche Abstraktionsebenen zur Darstellung einer Stirnradstufe

Im weiteren Verlauf dieser Auswertung kristallisierte sich das Handlungsfeld „Funktionen im C&C-Ansatz“ als Kernthema der vorliegenden Arbeit heraus. Die Unterschiedlichkeit von Beschreibungen für Funktion und Gestalt deutete darauf hin, dass für die Verwendung von Funktionen als methodisches Hilfsmittel, nicht nur bezogen auf den C&C-Ansatz, Forschungsbedarf besteht.

So wurde die Frage aufgeworfen: **Warum haben Ingenieure und Studierende Schwierigkeiten Funktionen zu formulieren und auf die Gestalt zu beziehen?** Wenn die Darstellung von Funktion gelang, war die Frage: **Warum sind die Darstellungen von Funktion immer unterschiedlich?**

Die durchgeführten Projekte wurden mit einem Fokus auf Funktionen nochmals vertieft ausgewertet, um die o. g. Fragen gezielt zu beantworten. Des Weiteren

¹⁴ (Albers, et al., 2008)

wurde in Zusammenarbeit mit DR. CLAUDIA ECKERT ein Experiment entwickelt, durchgeführt und ausgewertet, um weitere vertiefte Erkenntnisse zur Anwendung von Funktionen zu gewinnen. Kern dieser Arbeit ist die Auswertung der durchgeführten Projekte und des Experimentes. Diese Auswertung führt zu Handlungsanweisungen und Definitionen für den Gebrauch von Funktionen im C&C-Ansatz.

1.3 Funktion im (Ingenieurs-) Alltag

Der Begriff Funktion ist allgegenwärtig. Beispielsweise beschreibt der Begriff „Funktionsjacke“ im täglichen Leben eine Art von Jacke, die in speziellem Maße wasserdicht ist und gleichzeitig eine hohe Atmungsaktivität gewährleistet. Hierbei stellt sich die Frage, ob gewöhnliche Jacken *nicht funktionieren* oder keine Funktion erfüllen. Im Ingenieuralltag ist Funktion eine Zielgröße des Entwicklungsprozesses, denn die Kunden, die das Produkt verwenden, sollen mit Erfüllung der Funktion zufriedengestellt werden. Die Funktion ist also Motivation für das Handeln der Ingenieure.

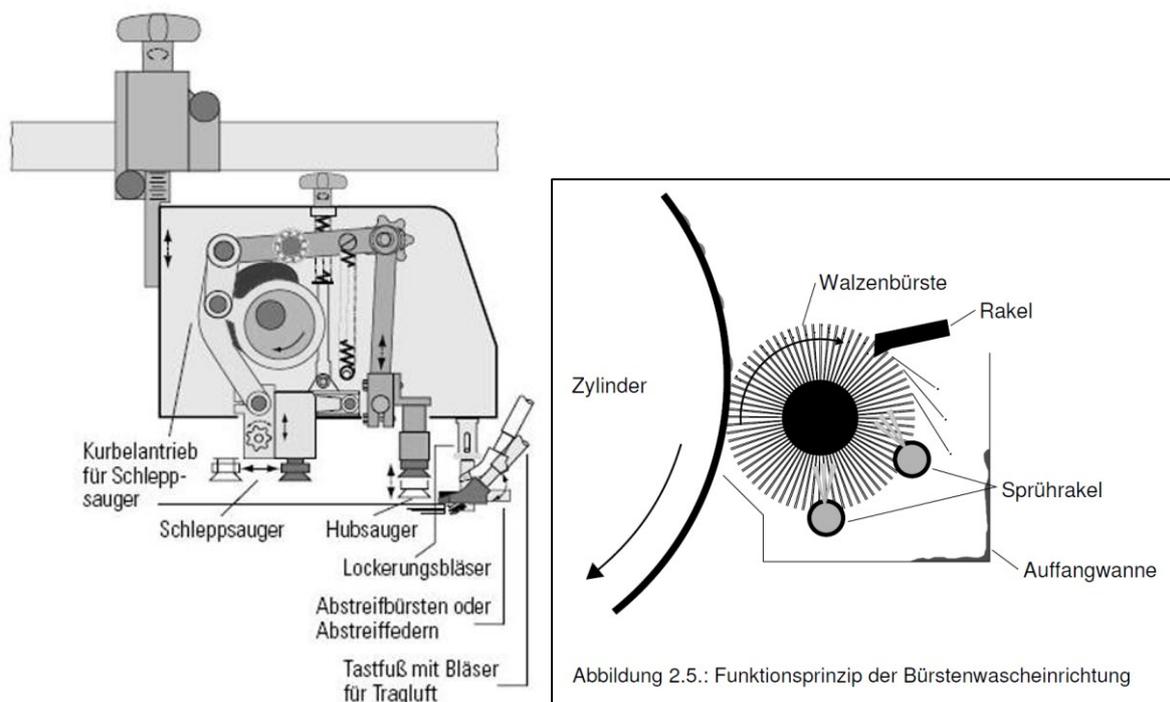


Abbildung 2: Gestalt zur Erklärung der "Funktionsweise"¹⁵

Abbildung 2 zeigt beispielhaft zwei typische Darstellungen, wie Funktionen von Produkten *erklärt* werden.

Dargestellt ist jeweils die Gestalt¹⁶ des Produktes, die Beschriftung weist die Darstellung als Funktionsweise oder Funktionsprinzip aus. Die Funktion wird

¹⁵ Aus Diplomarbeiten, die in dieser Arbeit ausgewertet wurden, siehe Abschnitt 5.1.2.

demnach implizit über die Gestalt erklärt. Die Benennung der Bauteile gibt einer entsprechend ausgebildeten Person Aufschluss darüber, was wo passiert. In derartigen Darstellungen wird meistens eine ideale Funktionsweise beschrieben.

Beispielsweise verdeutlicht die Bezeichnung als „Hub-Schleppsauger“, dass etwas angehoben und geschleppt wird. Zwar fehlt hier der Kontext der Diplomarbeit, jedoch wird das Erkennen der Funktion der Fähigkeit des Betrachters überlassen. Er muss das Bild interpretieren, um zu erkennen, wo sich etwas bewegt und was damit erreicht werden soll. Für Studierende, die technische Systeme verstehen sollen, ist dies oftmals eine schwer zu überwindende Barriere.

Ein technisches System erfüllt eine Vielzahl von Funktionen, die in Beziehung zueinanderstehen und somit Strukturen bilden, die in ihrer Gesamtheit von einem Ingenieur oder Studierenden nur schwer erfassbar sind. Diese funktionalen Zusammenhänge müssen für eine Neu- oder Weiterentwicklung des Systems jedoch verstanden werden. Sowohl in der Forschung, aber auch im Ingenieursalltag werden funktionale Zusammenhänge in Verbindung mit dem *Verständnis für das System* gebracht. C&C-M ist als Hilfsmittel für die Erarbeitung dieses Verständnisses zentraler Gegenstand dieser Arbeit. Wie die o. g. Forschungsfragen beantwortet werden, ist im folgenden Abschnitt „Struktur der Arbeit“ kurz dargestellt.

¹⁶ Die Gemeinschaft von Form und Stoffeigenschaft eines Körpers, unabhängig davon, ob der Körper substanzuell oder nur gedanklich existiert. Die Form beinhaltet hierbei alle geometrischen Körpereigenschaften, (Hansen, 1968)

1.4 Struktur der Arbeit

In dieser Arbeit wird das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz mit dem Fokus auf die Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktionen technischer Systeme behandelt.



Abbildung 3: Struktur der Arbeit

Hierfür wird zunächst in Kapitel 2 die in der Einführung kurz dargestellte Problematik aus Sicht der Forschung ausführlicher aufgearbeitet. Aus dem Stand der Forschung werden die spezifischen Ziele, Forschungshypothesen und Forschungsfragen abgeleitet und erklärt. In Kapitel 4 wird beschrieben, warum die Forschungsfragen empirisch zu beantworten sind und welche Methoden in der vorliegenden Arbeit angewandt wurden. In Kapitel 5 wird detailliert beschrieben, wie die Projekte verlaufen sind, wie diese ausgewertet wurden und welcher Erkenntnisse gewonnen wurden. In Kapitel 6 werden in gleicher Weise die Auswertung und die Ergebnisse des Experimentes beschrieben.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse zusammengeführt und Anforderungen für Funktionen beim Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz, aber auch allgemeiner Art abgeleitet. Die C&C-Ansatz bezogenen Anforderungen werden in Kapitel 8 verwendet, um Handlungsvorschläge für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz zu formulieren.

2 Stand der Forschung

Zu Beginn der Beschreibung relevanter Arbeiten wird das allgemeine Umfeld des Themas beleuchtet. Dies führt zum Abschnitt „Heuristisches Vorgehen für Gestaltungsprobleme“. Hier wird zunächst beschrieben, welche Merkmale das Vorgehen beim Lösen von Gestaltungsproblemen charakterisiert. Danach wird mithilfe der Beschreibung von „Methoden zur Problemlösung“ und dem damit verbundenen „Vorgehen und Problemdarstellung“ über die „Merkmale erfolgreicher Vorgehensweisen“ zur Bedeutung von „Abstraktion beim Lösen von Gestaltungsproblemen“ geführt. Es wird gezeigt, dass Funktion innerhalb des Gestaltungsprozesses ein immanent wichtiges Hilfsmittel mit unterschiedlichen Bedeutungen darstellt. Mit Funktionen werden Abstraktionen der Beschreibung eines Produkts dargestellt. Die unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion aus unterschiedlichen Ansätzen werden in einem separaten Abschnitt eingeordnet und es wird aufgezeigt, dass unterschiedliche Ansätze unterschiedliche Schwerpunkte bilden. Dieses Vorhaben wurde durchgeführt, um die Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz zu evaluieren. Deshalb wird der Stand der Forschung mit einer Betrachtung des C&C-Ansatzes, die auf das Anwendungsgebiet des Lösens von Gestaltungsproblemen fokussiert wird, abgeschlossen.

2.1 Allgemeines Umfeld des Themas

Zunächst wird ein kurzer Abriss über die Geschichte der Konstruktionsmethodik gegeben, bevor mit den Themen „Systemtechnik“ und „Einführung von Methoden in Unternehmen“ spezielle Grundlagen für dieses Vorhaben beschrieben werden.

2.1.1 Unterstützung des Konstruktionsprozesses

PAHL¹⁷ definiert die Konstruktionsmethodik als „konkrete Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie, aber auch den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben haben“. Historisch gesehen stellen die Ansätze von REDTENBACHER¹⁸ und REULEAUX¹⁹ die ersten Arbeiten im Bereich der Konstruktionsmethodik dar. Diese erschienen bereits in der

¹⁷ (Pahl, et al., 2003 und 2005)

¹⁸ (Redtenbacher, 1852)

¹⁹ (Reuleaux, 1875)

Mitte des 19. Jahrhunderts und wurden durch eine Vielzahl von Forschern bis in die heutige Zeit immer weiterentwickelt²⁰.

In den 60er Jahren führte der „Engpass Konstruktion“ zu zunehmenden Anstrengungen, die Konstruktion zu systematisieren²¹. An den deutschen Universitäten wurden Lehrstühle für Konstruktionstechnik eingerichtet. Das Resultat der systematisch-normativen Anstrengungen dieser Zeit und der darauf folgenden Jahre waren Vorgehenspläne, die einen zielgerichteten Ablauf der Konstruktion vorgeben. Diese haben bis heute ihre Gültigkeit und prägen die aktuelle Konstruktionsforschung stark²². Sie finden sich z. B. in der VDI Richtlinie 2221²³ oder in den Werken von PAHL und BEITZ²⁴, ROTH²⁵, RODENACKER²⁶, KOLLER²⁷, HUBKA²⁸ wieder.

Die Ansätze präsentieren in der Regel ein Vorgehensmodell zur Beschreibung des Ablaufs des Konstruktionsprozesses und entwickeln Modelle zur Beschreibung des Systems auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Diese Abstraktionen werden durch den Konstrukteur während des Prozesses manipuliert und in andere Abstraktionen weiterentwickelt. Diese Modelle sind sowohl erklärend, intentionsbeschreibend als auch strukturell und ergebnisbeschreibend.

Die klassischen Ansätze der Konstruktionsmethodik sind noch immer Basis für die Konstruktionsmethodik und für die Ingenieurausbildung in Deutschland. Ein großflächiger Einzug der Methoden in die industrielle Praxis scheint allerdings bis heute nicht stattgefunden zu haben²⁹, da sie offenbar nicht die charakteristischen Merkmale des Lösens von Gestaltungsproblemen treffen.

Seit den 1960er Jahren wird in Studien beobachtet, welche Vorgänge die Produktentwicklung und die sie ausführenden Ingenieure charakterisieren³⁰. Mit der *empirischen Konstruktionsforschung* wurde der Weg zur „harten Wissenschaft“³¹ eingeschlagen. Ihr Ziel ist, das Verhalten von Ingenieuren abzubilden. Dabei soll aber nicht unbedingt die Güte des Vorgehens bewertet werden, vielmehr soll

²⁰ (Jänsch, 2007)

²¹ (Franke, 1995)

²² (Bender, 2004)

²³ (VDI, 1993)

²⁴ (Pahl, et al., 2003 und 2005)

²⁵ (Roth, 1994)

²⁶ (Rodenacker, 1970)

²⁷ (Koller, 1994)

²⁸ (Hubka, et al., 1992)

²⁹ (Franke, 1995), (Blessing, 1994), (Bender, 2004), (Geis, et al., 2008), (Jensen, et al., 2010)

³⁰ (Bender, 2004)

³¹ (Lossack, 2004)

theoretisches Wissen und Verständnis über die konstruktive Tätigkeit und ihre Anwendung im Feld geschaffen werden. Die Ergebnisse der empirischen Konstruktionsforschung sind Beschreibungen und Erklärungen für die realen Abläufe im Gestaltungsprozess, die in neuen Ansätzen, Definitionen und Handlungsempfehlungen münden. Die empirische Erforschung hat noch nicht zu einer allgemein anerkannten Beschreibung der Vorgänge in der Produktentwicklung geführt³², jedoch gibt es viele Arbeiten, die ansatzweise erklären, was das Lösen von Gestaltungsproblemen charakterisiert.

2.1.2 Systemtechnik, Systems Engineering und Systemtheorie

Bei der Lösung von Gestaltungsproblemen wechseln gute Produktentwickler die Perspektive der Problembeschreibung: „Zum einen handelt es sich um direkte Gedankengänge zum Problem [z. B.: Wie befestige ich dieses Element?]. Zum anderen wird eine übergeordnete Thematik bedacht „z. B. Wozu befestige ich das Element?“³³. Dieser Sachverhalt wird durch die methodische Unterstützung in der Systemtechnik abgedeckt. Die Systemtechnik oder Systems Engineering³⁴ basiert auf der Systemtheorie. Die Systemtheorie beschreibt auf einem allgemeinen Niveau, wie ein Gesamtsystem und dessen Teilsysteme zusammenhängen. Hierbei ist wichtig, dass die Teilsysteme interagieren, um ihre Funktionen zu erfüllen. Die in Abbildung 6 gezeigte Funktionsstruktur ist im Sinne der Systemtechnik aufgebaut. Nach der Zerlegung in Teilsysteme können Teillösungen gesucht werden, die anschließend wieder zum Gesamtsystem zusammengesetzt werden. Im Zusammenspiel der einzelnen Elemente ergibt sich eine höhere Qualität als die Summe der einzelnen Elemente (Emergenz).

Jedes System erfüllt seine Funktion immer in Wechselwirkung mit seiner Umgebung, d. h., jedes System hat ein oder mehrere Nachbarsysteme. Des Weiteren lässt sich jedes System in ein Supersystem einordnen und kann in Teilsysteme zerlegt werden. KLAUS³⁵ unterscheidet offene und geschlossene Systeme. Ein geschlossenes System hat die Eigenschaft, dass die Inputs aller seiner Elemente zugleich Outputs anderer Elemente des gleichen Systems und dass alle Outputs von Elementen des Systems zugleich Inputs anderer Elemente dieses Systems sind. Ein solches System besteht nur aus inneren Elementen. Geschlossene Systeme sind rein theoretische Konstrukte, da auf der Welt keine Systeme existieren, die vollständig gekapselt sind

³² (Bender, 2004)

³³ (Franke, 1995)

³⁴ (Züst, 1998)

³⁵ (Oerding, 2009)

und keine Informationen, Stoff, oder Energie über ihre Grenzen während ihres Lebenszyklus austauschen.

„Systemtheorie ist ein mächtiges Werkzeug im Versuch, die komplexe Natur dieser Materie zu handhaben. Zusammen mit Werkzeugen zur Darstellung der Systemmodelle hilft sie, Zusammenhänge zu begreifen und Reaktionen auf Veränderungen abzuschätzen. Das Systemdenken hilft dem Produktentwickler dabei, stets seine Problemstellung in den allgemeinen Kontext einzuordnen. Er muss sich in der Systemhierarchie richtig aufstellen. Er ist gezwungen, den Zweck seines Wirkens (Teleologie) zu erkennen und seine Handlungen danach auszurichten. Dabei betrachtet er das Eine und das Viele“³⁶. So werden auf übergeordneter Ebene in der Hierarchie oftmals eher Zweck beschreibende Formulierungen verwendet und auf detailliertere Ebene eher physikalisch/chemische Beschreibungen des Verhaltens eingesetzt. Ein Entwickler kann sich so in der beschriebenen Art und Weise im System orientieren und sein Handeln danach ausrichten. Hierfür sind jedoch unterschiedliche Bedeutungen von Funktion absolut notwendig.

ROPOHL nimmt diese Unterscheidung zwischen teleologischer und deskriptiver Beschreibung der Funktion eines Systems in seiner Systemtheorie der Technik vor. Mithilfe der deskriptiven Funktion eines technischen Systems werden die „Zusammenhänge zwischen den Attributen eines Systems“ beschrieben³⁷. Unter dem teleologischen Funktionsbegriff versteht er den Begriff Funktion im Sinne von Zweck. In der „Technik kommen beide Funktionsbegriffe vor. Dem Schaltgetriebe eines Kraftfahrzeuges kann man die Funktion zuschreiben, die vom Motor eingegebene Drehbewegung nach Drehzahl und Drehmoment in die Drehbewegung umzuwandeln, die an die Antriebsräder ausgegeben wird; das ist der deskriptive Funktionsbegriff. [...] Man sagt aber auch, die „Funktion“ des Getriebes bestehe darin, Drehzahl und Drehmoment der Antriebsräder den jeweiligen Fahrerfordernissen anzupassen; hier liegt der teleologische Funktionsbegriff vor, da man mit denselben Worten den Zweck des Getriebes kennzeichnen kann. Der Zweck aber liegt außerhalb des betrachteten Systems und impliziert eine menschliche Instanz, die den Zweck als solchen gesetzt hat“³⁸. Die beiden unterschiedlichen Beschreibungen dienen in diesem Sinne einerseits der Orientierung im System (wo bin, was tue ich hier?) und andererseits zur gezielten Erklärung der sich im Zusammenhang befindlichen einzelnen Sachverhalte.

³⁶ (Oerding, 2009)

³⁷ (Ropohl, 2009)

³⁸ Ebd.

ROPOHL zeigt drei Perspektiven auf technische Systeme auf. Diese sind das funktionale Konzept, das strukturelle Konzept und das hierarchische Konzept (Abbildung 4).

Auch er beschreibt, dass ein System seine Funktion stets in Wechselwirkung mit der Umgebung erfüllt (funktionales Konzept), dass das System in ein übergeordnetes System einzuordnen sein muss (hierarchisches Konzept) und dass ein System in Teilsysteme auf gleicher Ebene zerlegbar ist (strukturelles Konzept). Die Teilsysteme stehen in Relation zueinander und sind somit Bedingung dafür, dass die Gesamtfunktion erfüllt werden kann.

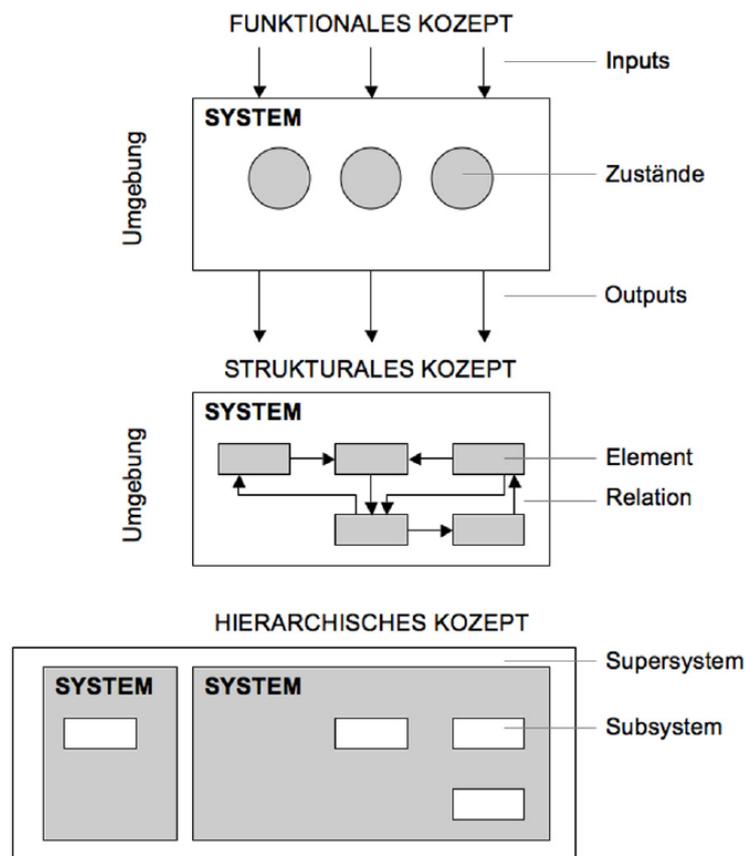


Abbildung 4: Konzept der Systemtheorie nach ROPohl

Viele konstruktionsmethodische Ansätze basieren auf der Systemtechnik. So führen beispielsweise auch PAHL und BEITZ in den ersten Kapiteln der Konstruktionslehre³⁹ die „technischen Systeme“ ein und verwenden diese Terminologie für die Beschreibung von Funktion.

³⁹ (Pahl, et al., 2003 und 2005)

2.1.3 Einführung von Methoden in Unternehmen

Neben der theoretischen Entwicklung von Methoden und Werkzeugen spielt der Transfer von in der Forschung erarbeiteten Methoden hin zu den Anwendern eine wichtige Rolle. Dieser Transfer scheitert in der industriellen Praxis oftmals aus mehreren Gründen. Beispielsweise wurde von REINICKE⁴⁰ die Überladung der Methoden mit Theorie und Komplexität aufgeführt. Dies resultiert darin, dass Anwender nur den Aufwand einer Methodenanwendung sehen und nicht den Nutzen. Des Weiteren werden Methoden in der Industrie zu langsam implementiert und zu wenig an die Gegebenheiten des Umfeldes angepasst. Methoden werden aufgrund mangelnder professioneller Einführung falsch angewandt und bringen daher nicht die Ergebnisse, die erzielt werden könnten. So ist wieder der Aufwand hoch und der Nutzen gering.

BIRKHOFFER und JÄNSCH⁴¹ formulieren Anforderungen an erfolgreichen Methodentransfer, nachdem sie folgende Hauptprobleme identifiziert haben:

- Dokumentation und Darstellung der Methode sind zu wissenschaftlich und wird von den potenziellen Anwendern nicht verstanden.
- Inflexibilität der Methoden: Die Möglichkeit Methoden an den Anwendungskontext anzupassen fehlt und die flexible Anwendung verschiedener Methoden ist noch immer der Expertise der Methodenanwender überlassen.
- Mangelndes Methodentraining: Das Erlernen der Methoden wird nachlässig behandelt, sodass die Anwender nie eine Situation erleben, die den eingebrachten Aufwand durch Nutzen rechtfertigt. Die Methodenanwendung wird dann verworfen.
- Akzeptanzprobleme: Zweifel und Reserviertheit gegenüber Methoden, die aufgrund fehlgeschlagener Methodenanwendung entstanden sind, verhindern von vorneherein, dass eine Offenheit gegenüber neuen Vorgehensweisen entsteht.

Hieraus entwickeln BIRKHOFFER und JÄNSCH ein Modell für den erfolgreichen Methodentransfer. Die vier Säulen des Modells, die beim Transfer von Methoden für Akzeptanz und erfolgreiche Anwendung berücksichtigt werden sollen sind:

- Vereinfachung der Methoden: Da die Methoden zu theoretisch aufgebaut sind für den praktischen Gebrauch. Die Methodenentwickler sollten daher auch die eigentliche Anwendung der Methoden stark mit berücksichtigen.

⁴⁰ (Reinicke, 2004)

⁴¹ (Geis, et al., 2008), (Jänsch, 2007)

- Methoden sollten auch hinsichtlich Flexibilität in der Anwendung entwickelt werden. D. h., die Anwendungssituationen sollten im Vorfeld geklärt werden, sodass die Methode in einem möglichst großen Spektrum von Situationen angewandt werden kann.
- Die Einführung von Methoden sollte schrittweise durchgeführt und ständig begleitet werden, sodass auf die Gegebenheiten im Unternehmen reagiert werden kann, bis die Methode erlernt ist. Hierbei ist vor allem auch darauf zu achten, dass für die potenziellen Anwender von Beginn an der Nutzen der Methode sichtbar wird und möglichst bald eigene erfolgreiche Erfahrungen in der Anwendung der Methoden gemacht werden.
- Spezifische Schulung von Methoden: Methoden sollten durch angemessene Unterrichtseinheiten gelehrt und geübt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass unterschiedliche Unterrichtsformen unterschiedliche Aspekte vermitteln. Feedback und Reflexion der Anwendung der Methoden nach Unterrichtseinheiten spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

2.2 Heuristisches Vorgehen für Gestaltungsprobleme

Die Gestaltung von Produkten erfordert ein **heuristisches Vorgehen**. „Heuristische Methoden sind eine geordnete Menge von Vorschriften, durch die das angestrebte Ergebnis zwar nicht sicher erreicht wird, die aber bewirken, dass der Bearbeitungsprozess zielstrebig, sicherer bzw. effektiver verläuft“⁴².

Entwicklungsprozesse werden systematisch geplant. Merkmal von Problemlösungsprozessen für Gestaltungsprobleme ist jedoch, dass diese Planung verworfen oder angepasst wird⁴³, um auftretende Teilprobleme zu lösen, um die Vorgehensweise der gerade entstandenen Situation anzupassen.

Während RODENACKER⁴⁴, HUBKA⁴⁵ und zunächst auch PAHL und BEITZ⁴⁶, die Konstruktion als Informationsverarbeitung formulierten, mit dem Ziel den Konstruktionsprozess der Algorithmisierbarkeit durch den Rechner zugänglich zu machen, fand mit der empirischen Untersuchung realer Konstruktionsprozesse ein Paradigmenwechsel statt⁴⁷. Unter Einbeziehung von Erkenntnissen aus der Denkpsychologie und der Erforschung der Vorgänge beim Lösen von Problemen im

⁴² (Müller, 1990)

⁴³ (Visser, 1996)

⁴⁴ (Rodenacker, 1970)

⁴⁵ (Hubka, et al., 1992)

⁴⁶ (Pahl, et al., 2003 und 2005)

⁴⁷ (Bender, 2004)

Allgemeines wurde das Konstruieren mehr und mehr als heuristisches und komplexes Problemlösen verstanden⁴⁸.

2.2.1 Charakteristik von Gestaltungsproblemen

In den Mittelpunkt des Gestaltungsprozesses rückt seitdem zunehmend der Mensch mit seiner Fähigkeit zur Intuition und Kreativität. Damit verschiebt sich auch die Rolle der Konstruktionsmethodik. Ihre Aufgabe ist es, den Menschen beim Überwinden seiner Schwächen zu unterstützen und nicht ihn zu ersetzen⁴⁹. Die mentale Kapazität des Menschen ist begrenzt. Ein Entwickler kann immer nur Teile eines technischen Problems erfassen. Es gibt keine Garantie dafür, dass seine mentalen Modelle adäquat und konsistent sind. Ingenieure bemerken diese Begrenzung in der Regel erst, wenn sie mit Fragen konfrontiert werden, die sie nicht beantworten können⁵⁰. Erinnerung, Gedächtnis und Lernen geschehen durch Analogiebildung zwischen Neuem und Bekanntem. Diese mentalen Prozesse der Modellbildung beim Problemlösen laufen oft visuell konkret ab⁵¹. Konstrukteure neigen deshalb zur schnellen Fokussierung auf eine Lösung, die im bekannten Lösungsraum liegt⁵². Probleme auf einer abstrakten Ebene zu modellieren, ist hilfreich, um solche Vorfixierungen zu vermeiden. Problemlösungsprozesse sollten deshalb sowohl auf abstrakter als auch auf konkreter Ebene ablaufen, um verschiedene Ideen und Situationen zu erkunden, bis sich die beiden Wege der Beschreibung treffen⁵³.

Abstrakte Darstellungsweisen sind jedoch von Natur aus mehrdeutig, da sie keine Details einer Lösung festlegen. Sie lassen immer Raum für Interpretation. Dies ist einerseits hilfreich, da ein Lösungsraum offen gelassen und so Kreativität zugelassen wird. Auf der anderen Seite kann dies jedoch zu Fehlern führen, die durch die unterschiedlichen Interpretationsweisen der Beteiligten entstehen⁵⁴. Die bekannten Modellierungsarten unterstützen den Konstrukteur immer auf einem bestimmten Abstraktionsgrad und überlassen dem Menschen den wesentlichen Schritt der Integration der Modelle, um daraus letztendlich die konstruktiven Lösungen zu bestimmen. Die optimale Wahl von externen und internen (mentalen) Repräsentationen, die Informationen unterschiedlicher Abstraktionsgrade verknüpfen, sodass diese für das Vorgehen der Produktentwickler geeignet sind, ist

⁴⁸ (Ehrlenspiel, 2003), (Pahl, 1994), (Pahl, et al., 2003 und 2005), (Hutterer, 2005)

⁴⁹ (Lossack, 2004)

⁵⁰ (Stacey, et al., 2003)

⁵¹ Ebd.

⁵² (Simon, 1969)

⁵³ (Stacey, et al., 2003)

⁵⁴ Ebd.

ein zentraler Punkt der Konstruktionsmethodik⁵⁵, d. h., eine geeignete Modellbildungsstrategie ist von entscheidender Bedeutung.

So weist auch beispielsweise FRANKE⁵⁶ darauf hin, dass Komplexitätsreduktion, Detaillierung, Abstraktion und Formalisierung wichtige mentale Vorgänge beim Lösen von Gestaltungsproblemen sind. „Um technische Systeme verstehen zu können, um sie zu generieren und zu manipulieren, muss die Vielgestaltigkeit bzw. Komplexität realer technischer Systeme herunter gebrochen werden. Dies geschieht vorzugsweise durch vier nicht immer streng voneinander trennbare Vorgehensweisen: Zerlegung in Elemente, Abstraktion, Formalisierung und Vergrößerung“⁵⁷. Auch das Zusammenwirken der Vorgänge wurde bisher nicht näher untersucht und erklärt. Welche Kombination dieser nicht voneinander trennbaren Vorgehensweisen eine effektivere Produktentwicklung ermöglicht wird, nicht beschrieben. Hinweise oder Regeln fehlen an dieser Stelle.

Anleitung zur Erstellung von heuristischen Methoden wurde durch MÜLLER⁵⁸ herausgearbeitet. Er unterscheidet in der Konstruktionsmethodik grundsätzlich zwischen algorithmischen⁵⁹ und heuristischen Methoden.

„Heuristische Methoden können angewendet werden, wenn der erforderliche Vorgang nicht mehr völlig unsicher ist. Sie sind Ausdruck des Versuchs, Probleme methodenbewusst auch dort zu lösen, wo strikt algorithmisches Arbeiten nicht mehr möglich ist“⁶⁰. Bei Gestaltungsproblemen ist dies meistens der Fall, da hier durch die Lösungen etwas Neues hervor gebracht wird, somit noch unbekannt ist und deshalb der Weg zur Erreichung des Ziels vorab nicht vollständig bekannt sein kann. Dies gilt für Neuentwicklungen, aber vor allem auch für die Weiterentwicklung von Produkten, die in kleinen Schritten vollzogen wird. Ebenso ist in der Produktentwicklung das angestrebte Ziel meistens nicht vollständig bestimmt, da die Lösung eines Problems grundsätzlich an die Konkretisierung der Problemstellung gebunden ist⁶¹. Heuristische Methoden räumen daher dem Bearbeiter bewusst Freiheit in der

⁵⁵ (Zeitz, 1997) (Eckert, et al., 2010)

⁵⁶ (Franke, 1995)

⁵⁷ Ebd.

⁵⁸ (Müller, 1990)

⁵⁹ Algorithmische Methoden sind eine „Menge von Vorschriften die, adäquat angewendet, nach endlich vielen Operationen das anzustrebende Ergebnis sicher erreichen, oder begründen lassen, dass abubrechen ist. Sie können – sofern sinnvoll – bis zum Niveau logischer Elementaroperationen lückenlos expliziert werden“. Zur Lösung von Problemen in der Produktentwicklung sind diese nicht geeignet, da die durchzuführenden Schritte der Problemlösung vorab unbekannt sind.“ (Müller, 1990)

⁶⁰ (Müller, 1990)

⁶¹ (Albers, 2010)

Durchführung ein. Hierdurch können die individuellen Erfahrungen und Vorgehensweisen in die Lösung der Probleme mit eingebracht werden. Die Erfahrung der Bearbeiter bei der Lösung des Problems wird hierdurch auf das gewünschte Ergebnis ausgerichtet.

2.2.2 Methoden zur Problemlösung

Methoden zur Problemlösung sind heuristische Methoden, die Ingenieure beim Lösen von Gestaltungsproblemen sicherer werden lassen. Diese Problemlösungsprozesse sind auf einem übergeordneten Niveau formuliert, sodass sie für die Breite der Fälle anwendbar sind. Die Bezeichnung als Prozess impliziert oftmals, dass der heuristische Vorgang in einen eher algorithmischen überführt werden kann. Dies ist der Bestrebung die Vorgänge in der Produktentwicklung zu rationalisieren und zu standardisieren geschuldet. Das Lösen eines spezifischen Problems erfordert jedoch meistens eine mit nicht unerheblich großem Aufwand verbundene Anpassung.

Eine Vielzahl von verschiedenen Problemlösungsprozessen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Einsatzzwecken wurde entwickelt, um den Umgang mit Problemen effizient zu gestalten. In Unternehmen haben sich lediglich Problemlösungsprozesse für Notsituationen wirklich durchgesetzt. Im Bereich der Planungssituation haben Problemlösungsprozesse zwar in Wissenschaft und Forschung eine große Bedeutung, in der Praxis werden sie jedoch kaum konsequent eingesetzt⁶².

SAAK und ALBERS⁶³ stellen dar, wie Not- und Planungssituation differenziert werden können. Daraus werden unterschiedliche situationsgerechte Lösungsstrategien abgeleitet. Eine systematische Erweiterung von bekannten Problemlösungsprozessen wie z. B. der VDI 2221⁶⁴ und von EHRENSPIEL⁶⁵, führte zur Entwicklung der SPALTEN Methode⁶⁶, die Grundlage für das Vorgehen in den Studien dieser Arbeit ist.

Bei der Beschreibung von Problemlösungsprozessen werden Analyse und Synthese von den Anwendern oft als formal getrennt wahrgenommen, jedoch sind diese Schritte bei der Lösung von Problemen in der Praxis nicht zu trennen. So wird ein Problem erst dann richtig erfasst, wenn Lösungen für dieses Problem gesucht und

⁶² (Meboldt, 2008)

⁶³ (Saak, 2007)

⁶⁴ (VDI, 1993)

⁶⁵ (Ehrlenspiel, 2003)

⁶⁶ (Albers, et al., 2005)

wieder analysiert werden, d. h., das Problem entwickelt sich mit der Lösungssuche und kann durch Analyse a priori nicht vollständig erfasst werden. ALBERS trägt dem Rechnung, indem er einen Informationscheck (IC in Abbildung 5) in jedem Schritt der Problemlösung durchführt, um so die rekursive Veränderung der Ausgangsinformation durch die getroffenen Entscheidungen zu beurteilen.

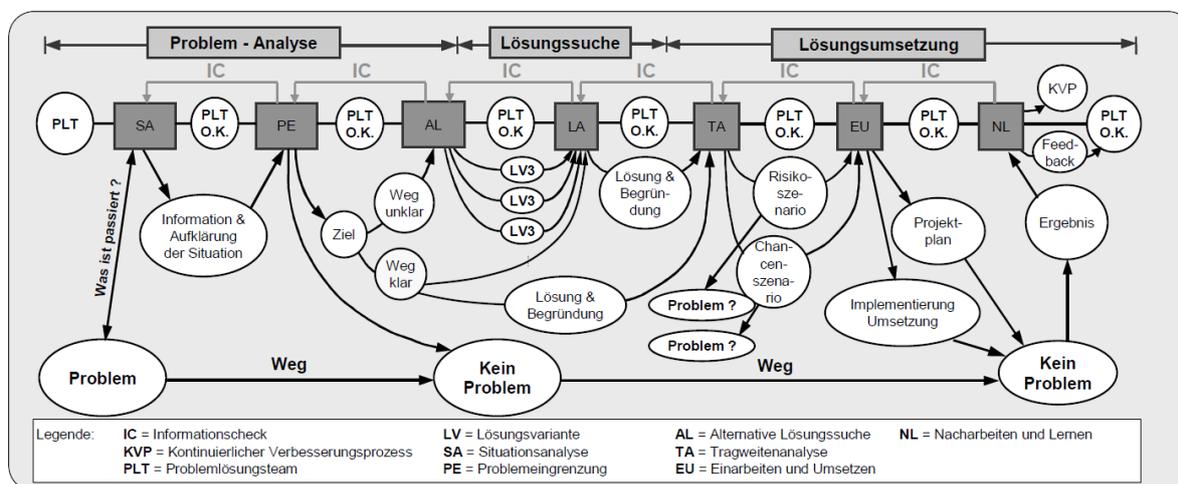


Abbildung 5: SPALTEN Methode⁶⁷

Während SPALTEN ein explizites Modell darstellt, so laufen viele Problemlösungen doch intuitiv und routiniert ab, da sie auf der Erfahrung der Beteiligten aufbauen. Für unbekannte Situationen sind explizite Modelle jedoch notwendig, um das eigene Vorgehen zu planen, zu reflektieren⁶⁸ und einen Lerneffekt zu erzielen. Die Aufgabe der Konstruktionsmethodik Vorgehensweisen zu explizieren und anschließend bereitzustellen, damit diese Vorgehensweisen verinnerlicht werden können, wurde bereits während des LADENBURGER DISKURSES⁶⁹ beschrieben.

2.2.3 Vorgehen und Problemdarstellung

Ein wichtiger Aspekt bei der Problemlösung ist die Problemdarstellung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Die Problemdarstellung muss flexibel sein, um bei Analyse und Synthese dem jeweiligen Abstraktionsgrad angepasst werden zu können. Eine effektive und effiziente Problemlösung erfordert nicht nur eine methodische Unterstützung des Prozesses, sondern gleichermaßen eine geeignete, am Prozess orientierte Problemrepräsentation⁷⁰. Diese Problemrepräsentation sollte dem benötigten Abstraktionsgrad angepasst werden. Jedoch ist das Abstrahieren ein

⁶⁷ (Albers, et al., 2005)

⁶⁸ Ebd.

⁶⁹ (Pahl, 1994)

⁷⁰ (Franke, 1995)

subjektiver Vorgang, der individuell unterschiedlich bewertet wird. Hierin besteht ein großes Problem der Konstruktionsmethodik, da in den Methoden die Abstraktionsebenen festgelegt werden (müssen) und somit nicht sichergestellt ist, dass diese Festlegung der benötigten Abstraktionsebene entspricht. Des Weiteren werden unter Abstraktion unterschiedliche Dinge verstanden, deren Unterschiede jedoch nicht überschneidungsfrei dargestellt und beschrieben werden. Nachfolgend wird dieser Sachverhalt erklärt.

2.2.4 Merkmale erfolgreicher Vorgehensweisen

Zahlreiche empirische Studien von Entwicklungsprozessen in Europa, aber auch den USA und Asien heben immer wieder ein Ergebnis hervor: Ein wesentliches Merkmal erfolgreicher Entwicklungsprojekte ist die ausführliche Analyse des Problems, bevor nach Lösungen gesucht wird.

HACKER⁷¹ beschreibt als Ergebnis von empirischen Studien, dass die „sorgfältige Klärung des Problems“ über einen zielgerichteten Verlauf entscheidet. D. h. „jeder an der Problemlösung Beteiligte sollte das gleiche Verständnis vom Problem haben“ damit eine effiziente Bearbeitung des Problems erfolgen kann. Hierbei ist insbesondere darauf zu achten, dass bei der Schaffung des Systemverständnisses „Konzentration auf die Objekte, die die Funktion bestimmen gelegt wird und eine ausführliche Analyse der Hauptfunktionen“ stattfindet. Die Arbeiten von BIRKHOFFER und JÄNSCH⁷², BLESSING⁷³, BENDER⁷⁴, FRANKENBERGER, BIRKHOFFER und BADKE-SCHAUB⁷⁵, beschreiben ähnliche Ergebnisse.

PAHL⁷⁶ folgert aus der Erforschung der Konstruktion in einer Kooperation der TU Darmstadt (Konstruktionswissenschaft), mit Bamberg (Psychologie) und München (Konstruktionswissenschaft), dass die Ausbildung in Konstruktionslehre dem Bearbeiter eines Konstruktionsproblems eine individuelle Vorgehensweise und deren begründete Anpassung ermöglichen muss. Hierzu ist es notwendig, dass Methodenentwickler die individuellen Vorgehensweisen herausarbeiten, sodass eine Anpassung der Methoden an die Vorgehensweisen situationsspezifisch stattfinden kann. EHRENSPIEL⁷⁷ (München) zeigt auf Basis empirischer Untersuchungen aus dem DFG-Projekt „Denkabläufe beim Konstruieren“ gemeinsam mit DÖRNER

⁷¹ (Hacker, 2002), (Hacker, 1997)

⁷² (Jänsch, et al., 2007)

⁷³ (Blessing, 1994)

⁷⁴ (Bender, 2004), (Bender, 2003)

⁷⁵ (Frankenberger, et al., 1998)

⁷⁶ (Pahl, 1994)

⁷⁷ (Ehrlenspiel, 2003), (Dörner, 1976)

(Bamberg), dass die Vorgehensweise im Gestaltungsprozess durch den Problemcharakter der Aufgabenstellung und die Limitierungen des Denkens bestimmt wird.

Während in den Anfängen der Konstruktionsforschung der Fokus auf der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen lag, so hat mit der empirischen Konstruktionsforschung ein Wechsel hin zum „Verstehen“ der Mechanismen der Produktentwicklung stattgefunden. Die Begründung für das Scheitern einer flächendeckenden Durchdringung von Konstruktionsmethodik in der Industrie durch die empirische Konstruktionsforschung führt zu einer Neuausrichtung der Forschungsprojekte.

So bauen ECKERT und CLARKSON⁷⁸ am Engineering Design Centre Cambridge seit 1995 den Forschungsbereich der „Change Prediction“ auf und entwickelten Methoden und IT Werkzeuge auf der Basis empirisch gewonnener Ergebnisse. Zahlreiche Studien in der industriellen Praxis begründen die Methodenergonomie und beziehen auf diese Art und Weise systematisch die Anwender der Methoden in den Methodenentwicklungsprozess ein. Indem der Entwicklungsprozess als ein Änderungsprozess verstanden wird, berücksichtigt Eckert, dass der Großteil der Gestaltungsprobleme keine „Neukonstruktionen“ sind. Vielmehr ist das Lösen von Gestaltungsproblemen durch konkrete Randbedingungen bereits existierender Lösungen bestimmt.

2.2.5 Abstraktion beim Lösen von Gestaltungsproblemen

Abstraktion ist ein universeller, jedoch schwach definierter Ausdruck. Typischerweise wird in philosophischen Diskussionen zwischen abstrakt und konkret unterschieden⁷⁹.

Abstrakte Objekte werden als solche bezeichnet, wenn ihnen bestimmte Merkmale fehlen, die konkrete Dinge innehaben. Dies impliziert, dass Abstrahieren ein Vorgang des Hervorhebens von bestimmten Aspekten ist, die als wichtig erachtet werden. Die Auswahl von zu kennzeichnenden Aspekten ist subjektiv beeinflusst durch das, was zu einem bestimmten Zeitpunkt unter einem bestimmten Blickwinkel wichtig erscheint. Abstraktion ist also kein deterministischer Prozess und beinhaltet Elemente subjektiver Auswahl. FRIGG⁸⁰ beschreibt, dass Abstraktion nur existiert, wenn es eine oder mehrere konkrete Darstellungen gibt, die eine spezifischere Beschreibung liefern können. Ein verwandtes und oft auch überschneidendes

⁷⁸ (Eckert, et al., 2004)

⁷⁹ (Eckert, et al., 2010), (Frigg, 2003)

⁸⁰ (Frigg, 2003)

Konzept der Abstraktion ist das Konzept von hierarchischen Darstellungen. Einer Beschreibung auf einer niedrigen Hierarchiestufe fehlen bestimmte Merkmale im Vergleich zu einer detaillierten, konkreten Ebene.

In der Produktentwicklung ist oftmals eine abstrakte Sichtweise auf das Produkt jene, die keine oder wenig Details der Gestalt beinhaltet, eine konkrete Sichtweise stellt die Gestalt des Produktes auf einer bestimmten Ebene des Details dar. Jedoch kann eine weitere Detaillierung der Gestalt, z. B. auf Ebene der Werkstoffeigenschaften, wieder als Abstraktion bezeichnet werden.

Produktentwickler setzen viele unterschiedliche Techniken und Methoden zum Lösen von Gestaltungsproblemen ein, die jeweils unterschiedliche Abstraktionsebenen der Produktbeschreibung adressieren. Jeder Methode liegt eine Art der abstrakten Darstellung des Produktes zugrunde. Im Sinne der klassischen, vorschreibenden Konstruktionslehre von bspw. ROTH, HUBKA, PAHL und BEITZ (detaillierter Review von CROSS⁸¹) beginnt die Produktentwicklung mit einer detaillierten Analyse der Anforderungen oder funktionalen Anforderungen. Diese sollen so weit als möglich detailliert herunter gebrochen werden, um später in Bauteile überführt zu werden. Diese Darstellung der Anforderungen wird als abstrakte Darstellung des Produktes aufgefasst, da diese Beschreibung keinerlei Information über die Gestalt des Produktes beinhaltet. Die rein abstrakten Darstellungen können mit Anforderungen der Produktentwickler in der Industrie kollidieren, da dort in den allermeisten Fällen bestehende Lösungen in Form von einzelnen Komponenten oder ganzen Teilsystemen wieder verwendet werden oder Ausgangspunkt für neue Konzepte und Ideen sind⁸².

Produktentwickler arbeiten sehr früh im Produktentstehungsprozess mit der Bauteilgeometrie als vorrangige Repräsentation des Produktes. Tatsächlich beklagen viele leitende Produktentwickler, dass sich ihre Mitarbeiter zu schnell auf ein Detail einer Lösung konzentrieren, als dass sie den Lösungsraum systematisch erkunden. SIMON⁸³ bezeichnet dieses Verhalten als „Satisfizieren“. Entwicklungsprozesse beginnen in der Realität mit einer Mixtur von detaillierten und groben Beschreibungen, genauso wie mit konkreten Produktdetails und auch abstrakten Anforderungen und Funktionsbeschreibungen. Ein Grund für die Vorfixierung von Produktentwicklern auf frühe Lösungen ist das Fehlen von Repräsentationen, welche zwischen abstrakt und konkret liegen. Beispielsweise können Ideen zweier Personen nur gleich interpretiert werden, wenn sie konkret genug beschrieben sind, sodass die

⁸¹ (Cross, 1989)

⁸² (Eckert, et al., 2004b)

⁸³ (Simon, 1969)

daraus resultierenden Auswirkungen sichtbar werden⁸⁴. Nur wenn die vorgeschlagene Lösung nicht den Anforderungen genügt, gehen die Produktentwickler einen Schritt zurück und erkunden den Lösungsraum auf abstrakte Art und Weise neu. Die Balance zwischen abstrakten und konkreten Beschreibungen variiert mit der Art des Projektes. Ein Projekt, in dem es um das Finden von grundsätzlich neuen Lösungen geht, wird einen starken Fokus auf abstrakte Beschreibungen legen. Es geht dann darum, neue Ideen auch außerhalb der eigentlichen Domäne zu suchen.

Der Fokus bei der Erforschung der Abstraktion lag bisher hauptsächlich auf deren Bedeutung für das Generieren von neuen Lösungen, d. h., der Fokus lag rein auf deren der Bedeutung für Kreativität. Es wurden Empfehlungen zum richtigen Abstraktionsgrad für Produktentwickler mit unterschiedlicher Erfahrung getätigt⁸⁵. Abstraktion ist jedoch genauso wichtig bei der Analyse komplexer Situationen, da die Fähigkeit der Menschen verschiedene Dinge gleichzeitig zu betrachten begrenzt ist und Produktentwickler in der Analyse erst den Lösungsraum aufspannen⁸⁶. **Durch die Analyse wird die Synthese vorbereitet.** Satisfizieren⁸⁷ bei der Analyse bedeutet dann, sich auf den erst besten Problemraum zu fokussieren, ohne das gesamte System betrachtet zu haben. Wirkungen benachbarter Systeme auf den betrachteten Teil des Systems werden ignoriert.

Ein Gestaltungsproblem kann von einem einzelnen Entwickler schwer in seiner Gesamtheit erfasst werden, da die mentalen Repräsentationsmöglichkeiten⁸⁸ limitiert sind. Produktentwickler können immer nur Teile einer Konstruktion erfassen und es gibt auch keine Garantie, dass diese mentalen Modelle konsistent oder sogar kohärent⁸⁹ sind. Menschen bemerken die Begrenztheit ihrer mentalen Repräsentation nur dann, wenn ihnen Fragen zum Sachverhalt begegnen, die sie nicht beantworten können. Dies gilt auch für die mentale Repräsentation des Verständnisses für ein technisches System. VISSER⁹⁰ und andere Autoren führten empirische Studien durch, um zu untersuchen, wie Produktentwickler neue Ideen generieren. Sie entdeckten, dass die Probanden eine systematische

⁸⁴ (Stacey, et al., 2003)

⁸⁵ Beispielsweise die VDI-Richtlinie 2221, die empfiehlt, Funktionen lösungsneutral zu formulieren und keine Vorfixierung zu erzeugen.

⁸⁶ (Deigendesch, 2009)

⁸⁷ (Simon, 1969)

⁸⁸ (Miller, 1956)

⁸⁹ Kohärenz bedeutet hier, dass der Gedankengang abgesehen von den inhaltlich formulierten Gegenständen und Tatsachen in sich logisch, zusammenhängend und nachvollziehbar ist.

⁹⁰ (Visser, 1996)

Vorgehensweise solange verfolgten, bis sie Schwierigkeiten bekamen und lokale Probleme lösen mussten.

Die Erforschung der mentalen bildlichen Repräsentation⁹¹ von komplexen Sachverhalten im Gehirn zeigt, dass Menschen eine subjektive Wahrnehmung der Vollständigkeit ihrer mentalen Repräsentationen annehmen. Jedoch sind diese mentalen Repräsentationen meistens weniger vollständig und detailliert, als die Person annimmt. Die Details werden immer erst dann „aufgefüllt“, wenn auf diese spezielle Stelle fokussiert wird.

Dieser Sachverhalt macht Abstraktion zu einem fundamentalen Teil der Fähigkeit Gestaltungsprobleme zu lösen. Abstraktionen ermöglichen einerseits das Problem zu vereinfachen und andererseits auf ein spezielles Problem zu fokussieren. HOOVER⁹² beschreibt, dass sich die Gestalt (design) eines technischen Systems durch Abstraktion und einer im Rahmen einer solchen Abstraktion auftretenden Verfeinerung entwickelt. Eng verbunden mit dem richtigen Abstraktionsgrad ist der richtige, vom Produktentwickler gewählte Detaillierungsgrad, um den Fokus der zu bearbeitenden Aufgabe zu setzen. Der Grad der Detaillierung, mit welchem Produktentwickler arbeiten, vergrößert und verkleinert sich ständig während des Prozesses.

Abstraktionen werden aus mentalen und physikalischen Modellen gebildet, die Produktentwicklern zur Verfügung stehen. Eine Abstraktion ist auch eine Sichtweise auf das zu lösende Problem und kann Produktentwickler in die Lage versetzen die Lösung zu überdenken und neue Erkenntnisse zu gewinnen. Dies zeigt, dass eine Repräsentation, die es erlaubt, ohne großen Aufwand zwischen unterschiedlichen Abstraktionsgraden zu wechseln der Fähigkeit erhöht, effektiv Lösungen zu generieren.

Der benötigte Abstraktionsgrad variiert mit der Problemstellung und auch mit der Erfahrung der Produktentwickler, die das Problem bearbeiteten, sodass in der Festlegung des Abstraktionsgrades ein Kernproblem für die methodische Unterstützung dieses Prozesses liegt. ZEITZ⁹³ beschreibt, dass Experten einen mittleren Abstraktionsgrad bevorzugen, der bewusst oder unbewusst variiert und an die Gegebenheiten angepasst werden kann. Der Grad sollte konkret genug sein, um das wirkliche Problem abzubilden und sie an die problematischen Details zu erinnern, andererseits aber auch abstrakt genug, um den Überblick über das

⁹¹ (Logie, 1995)

⁹² (Hoover, et al., 1991)

⁹³ (Zeitz, 1997)

Problem und mögliche Lösungen zu erhalten. Im Gegensatz hierzu benötigen Neulinge eher detailliertere, konkretere Repräsentationen, da sie die Details nicht mit abstrakten Repräsentationen rekonstruieren können.

2.3 Funktionen in der Konstruktionsmethodik

Die Abstraktion der Produkte so vorzunehmen, dass diese der Synthese gerecht wird, ist also eine wesentliche Fähigkeit von erfolgreichen Entwicklungsingenieuren. Dieser Zusammenhang liefert somit auch eine erste Erklärung dafür, dass es viele unterschiedliche Bedeutungen von Funktion gibt. **Die unterschiedlichen Bedeutungen von Funktionen sind unterschiedliche Abstraktionen eines Produktes.** Die Studie von ERDEN⁹⁴ listet 18 unterschiedliche Auffassungen von Funktionen im Ingenieurwesen auf. Diese Unterschiede sind Motivation für diese Arbeit, da sich die Bedeutsamkeit der Funktion alleine schon durch die Vielzahl der unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion widerspiegelt⁹⁵. Immer wieder wird versucht, eine einzelne, alles beschreibende Definition von Funktion einzuführen, um damit verbundene Missverständnisse⁹⁶ unter Ingenieuren zu verhindern. Da die Ausbildung von Ingenieuren oft lediglich die Vermittlung einer einzelnen Bedeutung von Funktion beinhaltet, sind Kommunikationsprobleme in der Zusammenarbeit vorprogrammiert.

In diesem Abschnitt werden zunächst verschiedene Auffassungen von Funktion in der Forschungslandschaft beschrieben, die auch mit unterschiedlichen Formulierungen und Darstellung in Funktionsstrukturen zusammenhängen. Anschließend wird ein Ansatz präsentiert, der die unterschiedlichen Auffassungen aufgreift, einordnet und vergleichbar darstellt. Dies führt zu einer Aufarbeitung des Begriffs Funktion, wie er in verschiedenen Forschungsarbeiten der Konstruktionsmethodik verwendet wird.

2.3.1 Verschiedene Auffassungen von Funktionen

Bereits VERMAAS⁹⁷ gibt den Hinweis, dass eine beispielhafte Betrachtung des von Forschungsarbeiten ausreicht, um die unterschiedlichen Auffassungen von Funktion ausreichend detailliert darzustellen.

In der VDI Richtlinie für die Analyse von Funktionen⁹⁸ wird die Definition der DIN1978 (Wertanalyse) verwendet. Hier wird die Funktion als „jeder Effekt und Eigenschaft

⁹⁴ (Erden, et al., 2008)

⁹⁵ (Vermaas, 2010)

⁹⁶ (Deng, 2002)

⁹⁷ (Vermaas, 2010), (Vermaas, 2009)

eines Objektes in der Wertanalyse“ definiert. Die Richtlinie definiert auch ungewollte Funktionen, welche wiederum in vermeidbare oder nicht vermeidbare eingeteilt werden. Mit Blick auf die VDI-Richtlinie VDI2221⁹⁹, in der ein Vorgehen zum Lösen von Gestaltungsproblemen vorgeschlagen wird, zeigt sich, dass innerhalb einer einzelnen Organisation unterschiedliche Bedeutungen von Funktion definiert werden, um unterschiedlichen Anwendungen gerecht zu werden. In der VDI2221 wird eine Funktion als „eine Zustandsänderung von Stoff, Energie und Information“ definiert.

Auch CHANDRASEKARAN¹⁰⁰ versucht nicht zu bestimmen, welche Definition die eine richtige ist. Er versucht auch nicht, eine weitere Definition anzuführen. Er führt, wie BROWN und BLESSING¹⁰¹, ein Rahmenwerk an, das die Ähnlichkeiten der unterschiedlichen Auffassungen erklärt. Im Unterschied zur VDI-Richtlinie VDI2221 habe die Funktionen nach CHANDRASEKARAN und BROWN und BLESSING gemeinsam, dass sie beschreiben „wie sich ein System verhält“ oder dass das System „eine Eigenschaft besitzt, die von jemandem beabsichtigt oder gewollt ist“.

Es wird also unterschieden zwischen Funktion als „beabsichtigte Wirkung“ und Funktion als „Beschreibung der Vorgänge im System“. Die Auffassung der Funktion als beabsichtigte Wirkung stammt aus der Notwendigkeit zu beschreiben, wie das zu gestaltende System auf das benachbarte wirkt. Die Beschreibung, „wie sich das System verhält“ ohne direkt auf die „Wirkung des Systems auf seine Umgebung einzugehen“, tritt jedoch ebenso oft auf und wird bei der Erstellung von Systemen mit der ersteren Bedeutung vermischt dargestellt. **Es werden also beide Auffassungen verwendet und benötigt.**

Die PAHL und BEITZsche Definition von Funktion ist eine weitverbreitete Auffassung von Funktion als „Transformation von Zustandsgrößen“. Dies schließt die Wirkung des beschriebenen Systems auf seine Umgebung, den Zweck, nicht mit ein. Funktion ist zwar etwas Gewolltes, jedoch bezieht sich dies nicht auf die Wirkung auf die Umgebung. Um diese Äußere Wirkung zu beschreiben, werden bei PAHL und BEITZ „Anforderungen“ für formuliert. WARELL¹⁰² bemängelt eben diesen Sachverhalt, dass mit der Auffassung von Funktion als Transformation von Zustandsgrößen, Umgebung orientierte Beschreibungen nicht berücksichtigt werden können. Dies ist beispielsweise notwendig, um die Interaktion des Produktes mit dem Benutzer zu bewerten.

⁹⁸ (VDI, 1996)

⁹⁹ (VDI, 1993)

¹⁰⁰ (Chandrasekaran, et al., 2000)

¹⁰¹ (Brown, et al., 2005)

¹⁰² (Warell, 1999)

CRILLY¹⁰³ kommt nach Analyse von Arbeiten zur Funktion zum Schluss, dass die Auffassung der Produktentwickler von Funktion von der Situation abhängt, in der sie sich gerade befinden. So wird verständlich, dass innerhalb des VDI unterschiedliche Auffassungen von Funktion entstanden sind. Eine Richtlinie bezieht sich immer auf eine bestimmte Situation und gibt Anleitung für ganz spezifische Anwendungen.

Bezogen auf das breite Spektrum der Bedeutung von Funktion ist das FBS (engl.: Function Behavior Structure) Modell von GERO und KANNENGIESSER¹⁰⁴ auf den ersten Blick nützlicher als das PAHL und BEITZsche Modell. In FBS wird zwischen dem Zweck beschreibenden Modell und der Beschreibung des Verhaltens unterschieden. Das Entwickeln von Produkten wird ebenfalls als eine Überführung der unterschiedlichen Abstraktionen¹⁰⁵ verstanden. Funktion beschreibt in FBS den Zweck, wohingegen Verhalten beschreibt, was von dem System erwartet wird und andererseits wie es tatsächlich agiert. FBS unterscheidet also klar zwischen zwei Bedeutungen, die bei Pahl und Beitz in einer einzigen Definition enthalten sind¹⁰⁶. In der VDI Richtlinie zum Entwickeln und Konstruieren wird diese Unterscheidung ebenfalls nicht vorgenommen. Obgleich es viele unterschiedliche Definitionen von Funktion gibt, fehlt es an einer Definition für das Verhalten und damit einer Abgrenzung zu Funktion.

2.3.2 Formulierung und Abstraktion von Funktion

In den Arbeiten von PAHL UND BEITZ wird in Anlehnung an die VDI-Richtlinie VDI1978¹⁰⁷ die Möglichkeit beschrieben, Funktionen mit einer Verb-Nomen Kombination zu formulieren. Das Verb sollte hierbei aktiv formuliert sein und keine „Möglichkeiten“ aufzeigen. Funktion ist also etwas das passiert und nicht etwas Potenzielles. Beispielsweise „Öl pumpen“ als Funktion für eine Axialkolbenpumpe oder „Drehmoment leiten“ für eine Welle. Diese Formulierungen stammen aus der Betrachtung der Umsetzung von Material, Energie und Information. Im Sinne von EHRENSPIEL¹⁰⁸ beschreibt das Nomen das Artefakt der Umsetzung und das Verb die vorgenommen Veränderung am Artefakt.

Des Weiteren wird oft darauf hingewiesen, Funktionen lösungsneutral zu formulieren, um eine Vorfixierung bei der Lösungssuche zu vermeiden. „Funktion ist eine

¹⁰³ (Crilly, et al., 2008).

¹⁰⁴ (Gero, et al., 2002).

¹⁰⁵ Funktion und Verhalten sind beides unterschiedliche Abstraktionen der Beschreibung des Produktes.

¹⁰⁶ (bypassing und cloaking in Sinne von VERMAAS aus Abschnitt 2.3

¹⁰⁷ (VDI, 1996)

¹⁰⁸ (Ehrlenspiel, 2003)

abstrakte Formulierung der Aufgabe, unabhängig von jeglicher Lösung“¹⁰⁹. Diese Definitionen dienen also dazu eine Lösungssuche vorzubereiten, wobei davon auszugehen ist, dass die Ziele und Intentionen bereits bestimmt sind.

ROTH zu Folge sollen Hauptfunktionen mit den drei Größen Material, Energie und Information beschrieben werden. Diese Größen erfahren eine Zustandsänderung, die mit speichern, leiten, wandeln, verbinden beschrieben werden sollen. Auf diese Weise werden 30 mögliche Kombinationen zur Formulierung von Funktion festgeschrieben.

In der Praxis haben die Anwender jedoch Schwierigkeiten, wenn sie Funktionen direkt derart abstrakt formulieren sollen. ROTH schlägt vor, mit konkreten Beschreibungen zu beginnen und ausgehend davon Abstraktion vorzunehmen, bis der gewünschte Abstraktionsgrad erreicht ist¹¹⁰. Es wird jedoch keine Anleitung gegeben, wie man zu einer konkreten Funktionsstruktur gelangen kann. Dieser analytische Schritt bestimmt jedoch die Größe des Lösungsraumes, sodass die zuvor erstellte konkrete Beschreibung der Funktion Ausgang für die Synthese sein sollte.

2.3.3 Darstellung vieler Funktionen in Funktionsstrukturen

Systeme erfüllen meistens eine Vielzahl von Funktionen, die wenn sie expliziert werden, geordnet dargestellt werden können. Bei der Strukturierung von Funktionen muss die Vielzahl der Funktionen so dargestellt werden, dass die Beziehungen zwischen den Funktionen sichtbar werden. Die Strukturierung der Funktionen wird üblicherweise durch Hierarchien vorgenommen, wobei die Funktionen einer untergeordneten Stufe zur Erfüllung der übergeordneten zusammenfassenden Funktion beitragen (siehe Abbildung 6). EHRENSPIEL¹¹¹ schlägt auch vor, zwischen Funktionen, die direkt zur Erfüllung der übergeordneten Funktion beitragen und Hilfsfunktionen zu unterscheiden. Zum Beispiel ist „Schmierung“ eine Hilfsfunktion und „Bewegung“ eine übergeordnete Funktion. Die Unterscheidung ist allerdings nicht immer eindeutig.

Zur Darstellung von Funktionsstrukturen werden neben der in Abbildung 6 dargestellten, prozeduralen Struktur auch Baumstrukturen verwendet.

Im Gegensatz zur prozeduralen Darstellung sind zwischen den einzelnen Teilfunktionen der Bäume auf derselben Hierarchieebene keine Beziehungen dargestellt.

¹⁰⁹ (Pahl, et al., 2003 und 2005), (Ehrlenspiel, 2003)

¹¹⁰ (VDI, 1996)

¹¹¹ (Ehrlenspiel, 2003), (VDI, 1996)

Bei Anpassungskonstruktionen werden Funktionsstrukturen erstellt, indem ein existierendes Produkt analysiert wird¹¹². Eine Neukonstruktion kann dann durch Variation, Hinweg- oder Hinzufügen von Teilfunktionen vorgenommen werden.

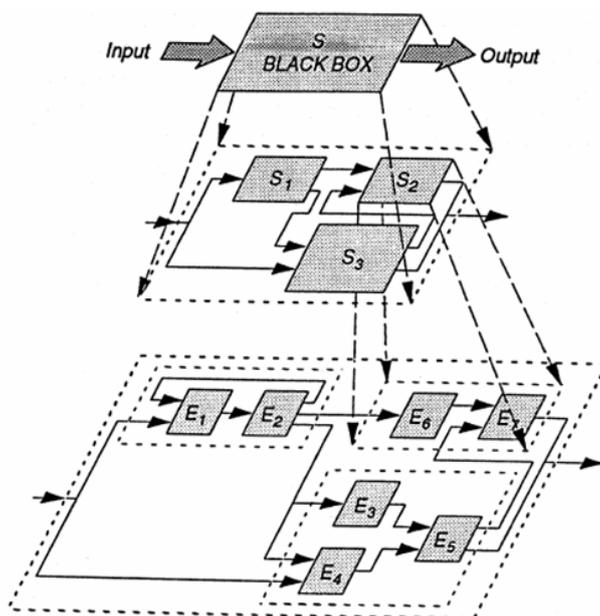


Abbildung 6: Prozedurale Funktionsstruktur auf unterschiedlichen Hierarchieebenen¹¹³

BÖRSTING, ALBERS UND ECKERT¹¹⁴ zeigen die Beziehungen zwischen Anforderungen und Funktionen auf. Beim Herausarbeiten von Funktionen können Anforderungen helfen Funktionen zu bestimmen, da die Anforderungen der Hauptfunktion übergeordnet sind. Je nach Anforderung ist es in manchen Fällen nicht möglich, Funktionen in die Struktur einzuordnen. Deshalb wird von ALBERS und ECKERT vorgeschlagen, unterschiedliche Funktionsstrukturen zu erstellen, um unterschiedliche Situationen zu berücksichtigen. Am Beispiel eines Kugelschreibers wird erläutert, dass für unterschiedliche Aktionen mit dem System, unterschiedliche Funktionsstrukturen sinnvoll sind, um die Komplexität des Systems aufzuzeigen und zu zerlegen. Im Beispiel wird dies durch die Aktion des „Schreibens“ und die Aktion des „Transports“ des Kugelschreibers aufgezeigt. Die Funktionen, die während des Transports erfüllt werden, sind in der Struktur für das Schreiben schwer einzuordnen. So entsteht eine zeitliche Strukturierung der Funktionen nach der Reihenfolge ihres Auftretens.

¹¹² (Pahl, et al., 2003 und 2005)

¹¹³ (Ehrlenspiel, 2003)

¹¹⁴ (Börsting, et al., 2008)

Die am häufigsten verwendete Form der Darstellung von Funktionen ist Text, der als erklärendes Element für die im System vorhandene Technik dient, oder erklärt, wofür das System entwickelt wurde.

2.3.4 5-Kern-Konzepte Beschreibung zur Einordnung von Funktionen

Nachfolgend wird die Einordnung unterschiedlicher Auffassungen von Funktion auf Basis der Arbeiten von VERMAAS¹¹⁵ vorgenommen. VERMAAS hat ein Konzept entwickelt, das erklärt, warum sich in der Konstruktionsmethodik so viele unterschiedliche Bedeutungen von Funktion entwickelt haben. Er erklärt, dass die anhaltende Diskussion, über eine einzige richtige Definition von Funktion hinfällig ist. Hierzu hebt er hervor, dass unterschiedliche Bedeutungen zum Lösen Gestaltungsproblemen benötigt werden. In der Notwendigkeit verschiedene Sachverhalte mit Funktion zu beschreiben zeigt sich auch die große Bedeutung von Funktion.

Es besteht ein Widerspruch in der Erforschung und Anwendung von Funktionen als methodisches Hilfsmittel. Einerseits verursachen die unterschiedlichen Bedeutungen und Auffassungen Probleme in der Kommunikation und somit in der Zusammenarbeit von Ingenieuren, andererseits werden die unterschiedlichen Bedeutungen benötigt, um unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden. Zur Herleitung dieses Widerspruchs eignet sich VERMAAS zunächst ein Modell von BROWN und BLESSING¹¹⁶ an, um das gesamte Spektrum der Bedeutungen von Funktion zwischen Ziele und Struktur/Gestalt aufzuspannen. Er modifiziert dieses Modell nur leicht und daraus resultiert die „5-key-concept description“ (5-Kern-Konzepte Beschreibung) für Produkte. In Abbildung 7 ist dies für das Beispiel eines Betonankers aufbereitet.

Die ursprünglichen „5-Kern-Konzepte“ Ziele, Aktionen, Funktion, Verhalten und Gestalt repräsentieren Beschreibungen für Produkte, die bei der Erstellung von Produkten in unterschiedlichen Situationen benötigt werden. Funktion ist in diesem Modell in der Mitte des Spektrums angesiedelt und diesem wird eine besondere Rolle zugewiesen.

BROWN und BLESSING¹¹⁷ identifizieren zwei unterschiedliche Sichten innerhalb der Auffassung von Funktion, sodass sich hier zeigt, dass es unterschiedliche Bedeutungen des Begriffes geben muss. Abbildung 7 zeigt bereits 6 unterschiedliche Kern-Konzepte. Dieser Umstand entstammt der Aufteilung der Funktion in das idealisierte Verhalten und der Zweck-bezogenen, Intention beschreibenden Funktion

¹¹⁵ (Vermaas, 2009), (Vermaas, 2010)

¹¹⁶ (Brown, et al., 2005)

¹¹⁷ (Brown, et al., 2005)

des Produktes. Diese Aufteilung in „6-Kern-Konzepte“ wird im weiteren Verlauf der Arbeit übernommen.

Ziele:	Erklären, warum die Auszugskraft streut, damit der Betonanker verbessert werden kann	Intention beschreibend
Aktionen:	Loch für den Betonanker bohren, Betonanker einschlagen	
Funktion in Sinne von Zweck:	Ein Produkt, um eine Brücke am Betonpfeiler befestigen	
Funktion im Sinne des idealisierten Verhaltens:	Ein Produkt, das sich durch Verschrauben im Beton festklemmt und somit eine Klemmkraft zwischen Brücke und Beton aufbringt	Physikalisch/chemische Beschreibung
Funktion im Sinne des tatsächlichen Verhaltens:	Durch das Verschrauben klemmt sich der Betonanker fest, zerstört den Beton und verrutscht .	
Struktur/Gestalt	Die geometrische stoffliche Beschreibung des Betonankers	

Abbildung 7: 5-Kern-Konzepte Beschreibung am Beispiel Betonanker¹¹⁸

Um die benötigten Bedeutungen zu erklären, bildet VERMAAS in der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung drei aktuell häufig zitierte Ansätze der Konstruktionsmethodik ab. Er kommt zum Schluss, dass die unterschiedlichen Bedeutungen in den Ansätzen FB¹¹⁹ (Functional Basis), MFM¹²⁰ (Multi Level Flow Modelling) und FBS¹²¹ jeweils mit einer Vereinfachung der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung zu erklären sind. Dadurch, dass jeder Ansatz das gesamte Spektrum zwischen den Zielen und der Gestalt abdeckt, wird die Bedeutung von Funktion in unterschiedliche Richtungen verschoben, erweitert und modifiziert (Abbildung 8, Abbildung 9). VERMAAS benennt diese Vereinfachung in den Ansätzen der Design Methodologie „konzeptionelles Verschleiern“ (conceptual cloaking) oder „konzeptionelles Umgehen“ (conceptual by-passing).

Das Konzept der Funktion dient dazu, die Zweck-bezogenen von den produktbezogenen Beschreibungen des Produktes „verdecken“ und abzugrenzen, beziehungsweise auch wieder eine Beziehung zwischen den beiden Bereichen herzustellen, sodass Funktion eine überbrückende oder verbindende Rolle einnimmt. Zum Beispiel ist es somit möglich, die Nutzer-Perspektive auf ein Produkt darzustellen, wenn kein Interesse an den physikalischen Grundlagen des Produktes besteht. VERMAAS zeigt dies am Beispiel einer Glühbirne, die eine Umwelt-bezogene Funktion „Licht auf Gegenstände im Umfeld der Glühbirne werfen“, und als Ziel „Ein

¹¹⁸ (Vermaas, 2010)

¹¹⁹ (Stone, et al., 2000)

¹²⁰ (Lind, 1994)

¹²¹ (Gero, et al., 2002)

Raum soll ausgeleuchtet werden“ aufweist. Im Gegensatz zum Ziel, das abstrakt beschreibt, was mit der Glühbirne erreicht werden soll, beschreibt die Funktion schon konkreter, wie das Ziel erreicht werden soll.



Abbildung 8: Argumentation mit zwei verschiedenen Bedeutungen von Funktion¹²²

Andererseits kann das Produkt auch aus der Perspektive der Technik beschrieben werden, wobei die Nutzer-Perspektive vernachlässigt wird. Der Fokus liegt dann auf der Beschreibung der physikalischen Vorgänge und die produkt-bezogene Funktion der Glühbirne kann mit *elektrische Energie in Licht umwandeln* beschrieben werden. Diese Beschreibung gibt nicht wieder, was mit der Glühbirne erreicht werden soll. Durch die Beschreibung der Gestalt (stoffliche und geometrischen Eigenschaften) und des Verhaltens wird das Verhalten untermauert. Zum Verhalten zählt auch das Umsetzen der elektrischen Energie in Wärme. Mit Funktion werden also unterschiedliche Aspekte des Produktes beschrieben.

In der Bedeutung von Funktion als Mittel zum Umgehen der vollständigen Beschreibung in der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung wird die Bedeutung von Funktion je nach Ansatz so weit ausgedehnt, dass die Beschreibung entweder die Aktionen oder das Verhalten des Produktes mit einbezieht (Abbildung 9).

Beispielsweise ist die Funktionsbeschreibung der Functional Basis (FB)¹²³ von PAHL und BEITZ¹²⁴ als „Umsetzen von Flüssen von Material, Energie und Signalen“ definiert. Innerhalb dieser Ansätze soll der Produktentwicklungsprozess mit einer Beschreibung der Gesamtfunktion beginnen. Diese wurden zuvor aus den Kundenwünschen (Zielen) abgeleitet. Die Funktion wird als Verb-Nomen Kombination mithilfe einer Blackbox Darstellung ausgedrückt. Diese Gesamtfunktion

¹²² (Vermaas, 2010)

¹²³ (Stone, et al., 2000)

¹²⁴ (Pahl, et al., 2003 und 2005)

wird dann in ein Netzwerk von Basisfunktionen herunter gebrochen, sodass in Bibliotheken nach Lösungen gesucht und kombiniert werden kann. Wenn man diese Auffassung von Funktion an der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung spiegelt, wird sichtbar, dass STONE und WOOD, wie auch PAHL und BEITZ von den Zielen über die Funktionen direkt zur Gestalt des Systems übergehen.



Abbildung 9: Umgehen der vollständigen Beschreibung mit Funktion¹²⁵

Dadurch, dass in unterschiedlichen Ansätzen das Spektrum zwischen Zielen und Gestalt unterschiedlich eingeteilt wird, entstehen unterschiedliche Auffassungen von Funktion und es bestehen so zum Teil sehr eingeschränkte Möglichkeiten, die unterschiedlichen Abstraktionen zu beschreiben.

Als Ergebnis dieser ausführlichen Analyse bestimmt VERMAAS 3 archetypische Bedeutungen von Funktion:

- Funktion eines Produktes als vorgesehene Verhalten dieses Produktes
- Funktion eines Produktes als gewünschte Wirkung¹²⁶ des Verhaltens des Produktes
- Funktion eines Produktes als Ziel/Zweck, für welchen die Produkte gestaltet werden.

Somit schreibt VERMAAS der Funktion in jedem Falle etwas vom Nutzer oder dem konstruierenden Ingenieur Gewolltes oder Zweckbezogenes zu. Dabei geht die Unterscheidung zwischen produktbezogener und nutzerbezogener Beschreibung nicht verloren. Die produktbezogene Beschreibung bleibt in der ersten der drei Bedeutungen von Funktion erhalten. Im Abschnitt 2.1 wurde diese Unterscheidung im Zusammenhang mit der Systemtechnik von ROPOHL bereits angedeutet. Dort wird

¹²⁶ Effekt nicht im Sinne eines physikalischen Effektes, sondern Effekt im Sinne der angestrebten Wirkung auf die Umgebung.

angeführt, dass die unterschiedlichen Perspektiven benötigt werden, um das eigene Handeln am übergeordneten Zweck auszurichten. Für ROPOHL¹²⁷ ist „interessant“, dass in der Technik beide Auffassungen von Funktion vertreten werden. Er versucht jedoch nur den deskriptiven Begriff zu verwenden, da er einen Ansatz liefert, die teleologische Auffassung in die deskriptive zu überführen. Im Sinne von VERMAAS ist dies wieder eine Vereinfachung der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung für Produkte, da ROPOHL vorschlägt, für zwei unterschiedliche Sichtweisen einen einzigen Begriff zu verwenden.

Analog zu dieser Einordnung von ROPOHL, werden nun weitere im Zusammenhang mit C&C-M relevante Ansätze der Konstruktionsmethodik beschrieben und mit der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung Produkten verglichen und eingeordnet.

2.3.5 Diskretisierung des Übergangs zwischen Funktion und Gestalt

Auf eine gewisse Art und Weise ist auch die 6-Kern-Konzept-Beschreibung von VERMAAS eine Diskretisierung des Übergangs zwischen Zielen und Gestalt. Die 6-Kern-Konzepte sind Beschreibungen auf 6 unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Jedoch fällt es an manchen Stellen schwer, den Unterschied zwischen den einzelnen Ebenen festzustellen. Zu jeder Bedeutung zwischen Zielen und Gestalt wird in konstruktionsmethodischen Ansätzen eine Abstraktion in Form eines Modells generiert. Die konstruktionsmethodischen Ansätze bestehen aus Modellsystemen, um die Lücke zwischen Zweck beschreibenden (abstrakten) und rein Geometrie-beschreibenden Modellen (konkreten) zu überbrücken. So soll ein schrittweises, methodisches Vorgehen ermöglicht werden. Der Entwicklungsprozess wird so in diskrete Schritte unterteilt, die bei jedem Ansatz verschieden groß sind.

Der Problemlösungsprozess wird dann als ein Prozess beschrieben, bei dem unterschiedliche Modelle aufeinander abgebildet werden und schrittweise ineinander überführt werden. Dies führt zur einer mehr oder weniger vorschreibenden Vorgehensweise, da für die Lösung eines technischen Gestaltungsproblems alle diskreten Zwischenschritte durchlaufen werden. Da das Lösen von Gestaltungsproblemen aber oftmals einen Wechsel der Modelle in nicht vorgesehener Reihenfolge erfordert, besteht hierin eine wesentliche Anwendungsbarriere: Die Entwickler müssen die Kombination von Modellen für ihr spezifisches Gestaltungsproblem selbst erstellen. Dieser nicht unerhebliche Teil der Anstrengung führt zur mehr oder weniger starken Ablehnung der vorgeschlagenen Methoden in der industriellen Praxis. BIRKHOFFER ET AL.¹²⁸ erklären dieses Phänomen

¹²⁷ (Ropohl, 2009)

¹²⁸ (Geis, et al., 2008)

als mangelnde Flexibilität und mangelnde Anpassbarkeit an die Aufgabenstellungen in einem speziellen Unternehmen.

Nachfolgend werden einige repräsentative Ansätze herausgehoben, um den Sachverhalt tiefer zu erläutern.

2.3.5.1 Klassische deutsche Konstruktionsmethodik

Repräsentativ für die Erforschung des Lösens von Gestaltungsproblemen werden hier vier Ansätze vorgestellt, wobei der erste Ansatz eine Gruppe von Forschern repräsentiert, die zum Ziel hatte die Konstruktion zu algorithmisieren¹²⁹. Des Weiteren wird neben Ansätzen von HUBKA und LINDEMANN die aktuelle VDI Richtlinie¹³⁰ zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte angeführt.

Systematisch-normative Ansätze mit dem Ziel der Algorithmisierung

Das formalisierte Modellsystem von ROTH¹³¹ hat zum Ziel den Gestaltungsprozess als algorithmisches Auswahlverfahren zu realisieren. Roth entwickelt zwischen Zielen (Aufgabenstellung) und Gestalt 16 sehr formale¹³² Modelle, die aufeinander aufbauen. Will ein Entwickler die Methode anwenden, muss er das Modellsystem kennen, sodass der Wechsel der Modelle im Gestaltungsprozess durchgeführt werden kann. Beispielsweise zeigt Abbildung 10, wie das Modell Nr.3 nach Modell Nr. 4 weiterentwickelt werden soll. Kennt er ein Modell nicht, entsteht ein Bruch in der Modellreihe. Je komplexer das formalisierte Modellsystem, desto schwieriger gestaltet sich dessen Erlernen. Des Weiteren schlägt ROTH ein Vorgehensmodell für die Produktentwicklung vor, das den Zeitpunkt der Entstehung der Modelle vorgibt. Roth sieht den Prozess nicht als rein sequenziell an und räumt Raum für Iteration ein. Betrachtet man das bereitgestellte Modellsystem, wird deutlich, dass bei Iteration ein Modellwechsel in ein früheres Modell notwendig ist. Wie das eine in das andere Modell überführt werden kann, ist methodisch nicht unterstützt und daher dem Anwender überlassen.

„Konstruieren mit Konstruktionskatalogen“¹³³ steht für ein algorithmisches Verfahren, das sich wenig durchgesetzt hat, da Produktentwicklung meistens nur auf Basis von Annahmen zu bewältigen ist. Neben ROTH kann auch das methodische Konstruieren nach RODENACKER¹³⁴ und die Konstruktionslehre nach KOLLER¹³⁵ zu den

¹²⁹ Eine strenge, lückenlose Abfolge logischer Elementaroperationen, (Müller, 1990).

¹³⁰ (VDI, 1993)

¹³¹ (Roth, 1994)

¹³² Formal im Sinne streng definierter und exakt beschriebener Elemente und Beziehungen

¹³³ Titel des Lehrbuchs von ROTH

¹³⁴ (Rodenacker, 1970)

algorithmisierenden Ansätzen gezählt werden. KOLLER bezeichnet sein Verfahren als „physikalisch und algorithmisch orientierte Methode der Konstruktion“. Ziel dieser Ansätze war die Automatisierung der Konstruktion, daher entspricht die Beschreibung des Verfahrens einem für den Rechner zugänglichen Ableitungs- und Kombinationsverfahren.

Konstruktionsphase	Modelle und ihre Eigenschaften		Produkt-darstellendes Modell	
	Modellbenennung	Nr.	Beispielhafte Darstellung (Ausschnitt)	Elemente: Verknüpfung
Aufgabenformulierungsphase	Aufgabenstellung	1	Sätze; z.B. technische Gebilde zum Heben eines Wagens konstruieren	Wörter; Syntax
	Hauptaufgabensatz Anforderungen	2	Objekt - Prädikat - Beziehungen z.B. Wagen heben oben halten, absenken Hubkraft, Größe, Gewicht usw.	Begriffe für Objekt und Prädikat; Syntax
Funktionelle Phase	Gesamtfunktionsmodell	3		Stoff, Energie, Information; Schwarzer Kasten
	Allgemeine Funktionsstruktur (AFS)	4		Allgemeine Funktionen, Verknüpfungsglieder
	IQ - Funktionsstruktur (IQF)	5		Ausgang, Eingang, Gleiche Funktionsgrößen
	Allgemeines Flußbild	6		Normierte Größen u. nicht normierte Operationen
	Logische Funktionsstruktur (LFS)	7		Binäre Zustände; logische Verknüpfungen
	Spezielle Funktionsstruktur (SFS)	8		Effekte physikalische Beziehungen
Prinzipielle Phase	Vektorielle Funktionsstruktur (VFS)	9		Mechan. Int.-u. Quantgrößen; Gleichgewichts- u. Geschwindigk.-Beziehungen
	Geometrische Funktionsstruktur (GFS)	10		Strukturfunktions-Elemente; Gleichgew.- u. Geschw.-Beziehungen
	Logische Schlußmatrix (LSM)	11		Binäre Relativlagen und logische Verknüpfungen
	Logische Schlußartenmatrix (LAM)	12		Kraftschluß für binäre Relativlagen
	Allgemeine und Logische Getriebe (Strukturskizze)	13		Glieder, Elementenpaarungen; Freiheitsgrad
	Geometrisch-Stoffliches Konturbild	14		Körper aus Regelflächen; Berührung ohne Durchdringung
Gestaltende Phase	Gesamt-Konturbild (Maßstablicher Entwurf)	15		Maschinenelemente; Kompatibilität
	Detail-Konturbild (Produktdokumentation)	16		Konturelemente; Darstellungsvorschrift

Abbildung 10: 16 Modelle zwischen Funktion und Gestalt nach ROTH

Abbildung 10 zeigt, dass alle Funktionen (funktionelle Phase) durch Flüsse von Material, Energie und Information beschrieben werden, die somit als Funktionen im Sinne des zu erwartenden Verhaltens der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung anzusehen sind. Die Ziele werden durch die Aufgabenstellung beschrieben und die Zweck-orientierte Funktion wird mithilfe der Hauptaufgabensätze und Anforderungen beschrieben. ROTH setzt also einen Schwerpunkt auf die physikalisch/chemische Beschreibung des Produktes, jedoch nicht auf die Zweck-orientierte Beschreibung, da er alleine für das Verhalten 8 unterschiedliche Funktionen definiert.

VDI Richtlinie zum methodischen Entwickeln

Die VDI-Richtlinien zum methodischen Entwickeln und Konstruieren VDI 2221 verwendet ebenfalls eine sehr abstrakte Auffassung von Funktion, die der Auffassung von PAHL und BEITZ sehr ähnlich ist. So ist die richtige Funktionsbeschreibung eines Wagenhebers „Stoff speichern“ (Abbildung 11), die in

¹³⁵ (Koller, 1994)

der 6-Kern-Konzepte Beschreibung sowohl Funktion im Sinne von Zweck als auch im Sinne von Verhalten beinhaltet.

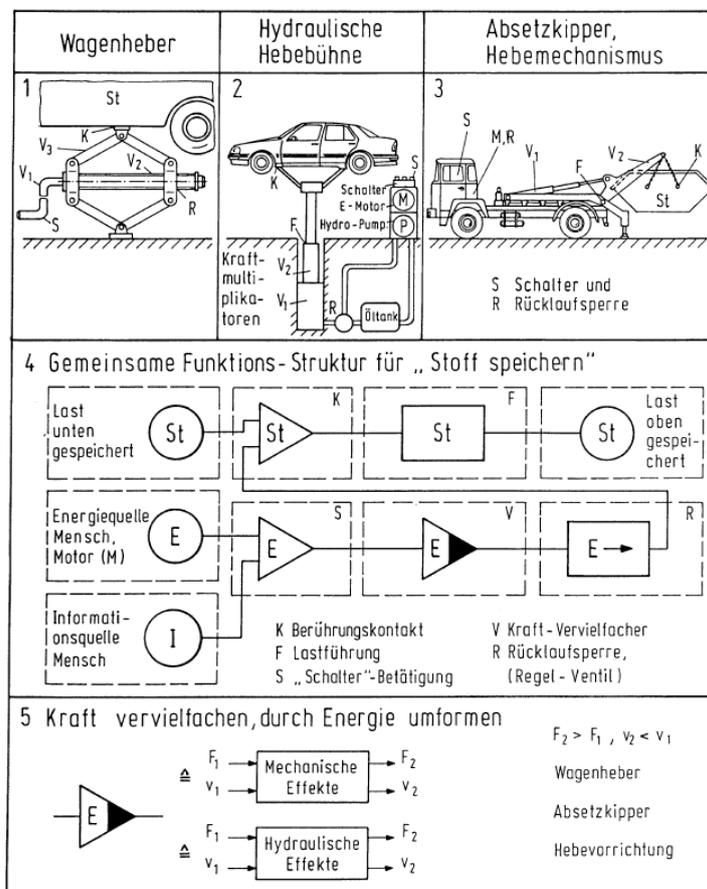


Abbildung 11: Funktionsstruktur des Wagenhebers¹³⁶

Hervorzuheben ist, dass die zuvor abstrakt formulierten Funktionen mit als Symbolen bezeichneten Buchstaben auf die Gestalt bezogen werden. Die Symbole finden sich in unterschiedlichen Varianten eines Wagenhebers wieder (siehe Abbildung 11, K= Kontakt, V= eine Kraftgröße für die Leitung vervielfacht wird, ...).

Auch bei der VDI Richtlinie liegt der Fokus auf der physikalisch/chemischen Beschreibung des Produktes. Das einzige Intention beschreibende Modell sind die Anforderungen, von denen direkt auf die Funktion übergegangen wird. Ausgehend von den Funktionen werden physikalische Effekte bestimmt, die als prinzipielle Lösungen bezeichnet werden und somit bereits die Gestalt/Struktur in der 6-Kern-Konzepte Beschreibung darstellen.

¹³⁶ (VDI, 2004)

Konstruktionswissenschaft nach HUBKA

HUBKA¹³⁷ gibt in der „Einführung in die Konstruktionswissenschaft“ eine umfangreiche Sammlung und Klassifikation verschiedener Modelle an. Die Modelle sind nach Zweck, Art der Darstellung, abgebildeter Eigenschaft und nach Darstellungstechnik geordnet. Abbildung 12 zeigt diese Vielzahl an Modellen, die zwischen der Aufgabe, die ein technisches System erfüllen soll und dem Original des technischen Systems erstellt werden, um das System zu beschreiben. Jedes Modell wird durch einen Code oder Convention (12 Mal Punkt C in Abbildung 12) mit den anderen Modellen verbunden, um die durch das Modell erlangte Erkenntnis in den Gestaltungsprozess einzubinden. Diese Konvention der Transformation soll die Modelle ineinander überführen. Dies ist im einzigen Beispiel der Quelle¹³⁸ nicht beschrieben. Beispiele sind nicht verfügbar. Die Integrationsleistung der Modelle muss also ohne methodische Unterstützung erfolgen.

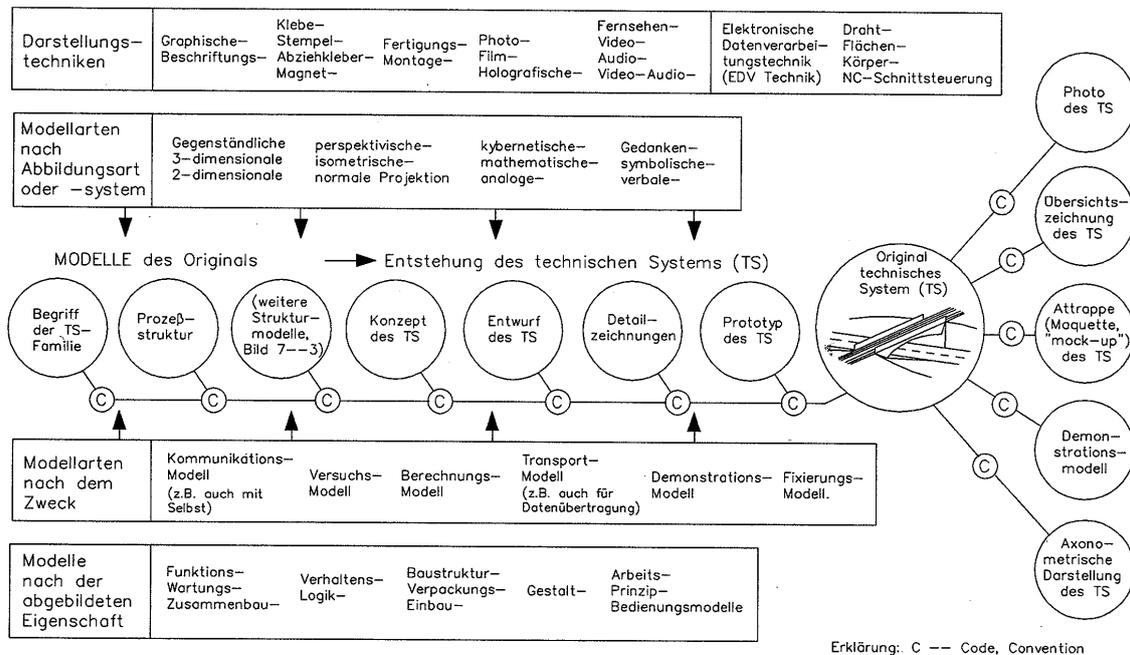


Abbildung 12: Modellbildung für technische Systeme nach HUBKA¹³⁹

Bei HUBKA ist hervorzuheben, dass er die Abstraktionen in die Art der Darstellung, den abgebildeten Zweck und den abgebildeten Eigenschaften einteilt. Zwischen den Zielen und der Struktur bestimmt HUBKA Aufgabe, Prozessmodell, Funktionsmodell, Organmodell und Baummodell, wobei die Aufgabe auch hier wieder das einzige Intention beschreibende Element ist.

¹³⁷ (Hubka, et al., 1992)

¹³⁸ (Hubka, et al., 1992)

¹³⁹ Ebd.

Vernetzung von Produktmodellen nach LINDEMANN

Neuere deutsche Ansätze wie zum Beispiel von LINDEMANN¹⁴⁰ betonen die vernetzte Modellbildung im Produktentwicklungsprozess in der Situation der Analyse und Synthese. Ausgangssituation ist auch hier, dass verschiedene Methoden nur singular anzuwenden sind und somit nur ganz bestimmte Aspekte in einer Produktentwicklung behandeln können. Durch die Vernetzung dieser Modelle durch Beziehungsmatrizen können die Merkmale aufeinander abgebildet werden. Abbildung 13 zeigt, wie Funktionen mit Lösungen durch eine Konsistenzmatrix gekoppelt werden können. So wird ersichtlich, welches Teilsystem welche Funktion erfüllen kann. Der Ansatz dient hauptsächlich der Bewertung und Erstellung von Produktarchitekturen, d. h., er bildet auch ab, wie komplex ein System ist.

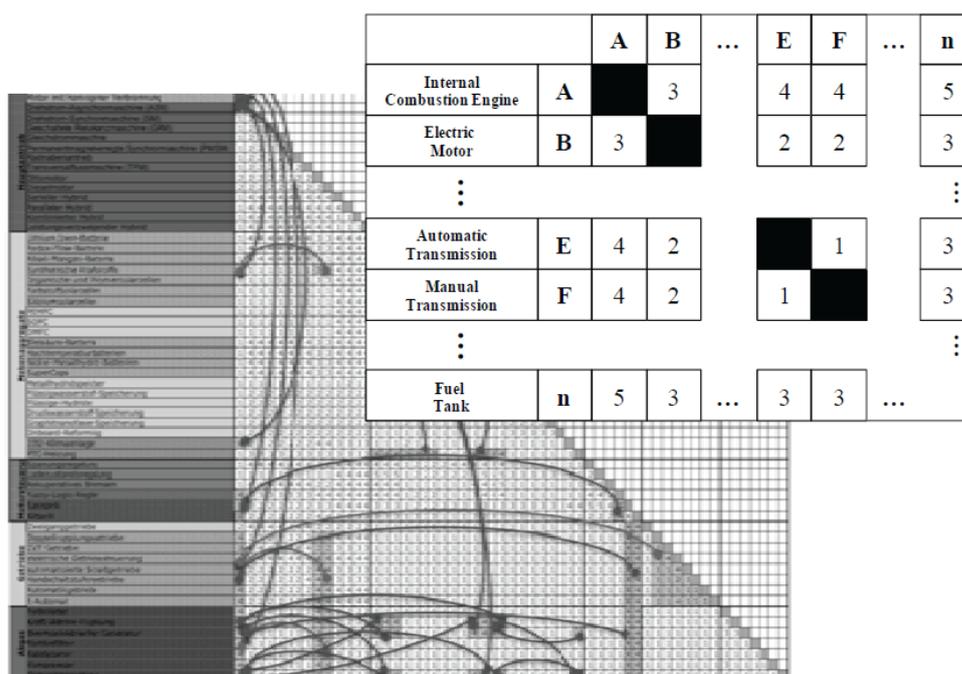


Abbildung 13: Verknüpfung von Funktionen und Lösungen nach LINDEMANN¹⁴¹

Die Komplexität ist dann bestimmt durch die Anzahl der Verknüpfungen zwischen Funktion und Lösung. Dies erlaubt zielgerichtet geeignete Lösungen auszuwählen und zu beurteilen und Lösungskombinationen vorzunehmen, wobei zu beurteilen ist, ob eine komplexe Lösung als positiv oder negativ aufzufassen ist. Die Methode bietet dem Entwickler jedoch wenig Unterstützung bei der tatsächlichen Gestaltung der Lösungen. Diese Art der Beschreibung von Funktion eignet sich für das Auswählen

¹⁴⁰ (Deubzer, et al., 2009)

¹⁴¹ (Deubzer, et al., 2009)

geeigneter Lösungen und deckt somit nur einen Teil des Spektrums zwischen Zielen und Struktur gemäß VERMAAS ab.

2.3.5.2 Angloamerikanische Ansätze im Engineering Design

Als repräsentativ für angloamerikanische Ansätze wurden *Functional Basis* (FB), Axiomatic Design (AD) und die *Function-Behavioiur Structure* (FBS) Ontologie im Folgenden beispielhaft dargestellt.

Funktionen basierte Systemtechnik nach STONE

Wie auch ROTH sehen STONE ET AL.¹⁴² im *Function Based Systems Engineering* den Entwicklungsprozess vorrangig als Auswahlverfahren bestehender Lösungen an. Bestehende Lösungen werden zu neuen Gesamtlösungen zusammengesetzt. Das Gestaltungsproblem besteht in diesem Verfahren in der Suche nach geeigneten Kombinationen bestehender Teillösungen. Auf die Gestaltung von Werkstoffen zur Erfüllung neuer Wirkungen oder Effekte, welche zur Funktionserfüllung genutzt werden können, wird nicht eingegangen. Der schrittweise Übergang von der „*Black-Box-Funktionsmodellierung*“ über „*Konzept-Funktions-Modelle*“, die „*Festlegung von Systemgrenzen*“ und der „*Festlegung von Lösungen innerhalb der Systemgrenzen*“ sieht hierbei keine Iteration vor. Zur „*Generierung von alternativen Lösungen*“ wird lediglich vorgeschlagen, den Auswahlprozess mehrfach zu durchlaufen. Der Ansatz bietet ein Rahmenwerk für prinzipielles Vorgehen, unterstützt aber nicht bei der Gestaltung konkreter Produkte. In Abbildung 14 sind auszugsweise zwei Modelle des technischen Systems „Antriebsstrang“ gezeigt,

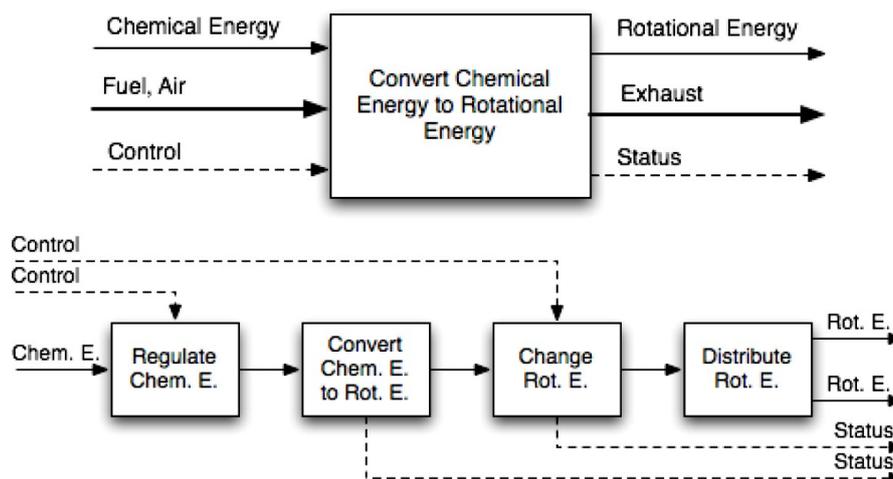


Abbildung 14: Blackbox Functional Modelling und Conceptual Functional Model¹⁴³

¹⁴² (Hutcheson, et al., 2007), (Stone, et al., 2000)

¹⁴³ Ebd.

Da die Funktionsbeschreibung in FB auf Basis der Konvention der Transformation von Zustandsgrößen vorgenommen wird, entsteht auch hier ein Fokus auf der Beschreibung des gewollten Verhaltens. Auf diese Weise muss die Intention beschreibende Perspektive ebenfalls mit dieser Konvention bedient werden, sodass im Sinne von VERMAAS die Beschreibung des Zwecks und der Aktionen der Anwender umgangen wird. FB wird scheinbar vorrangig dazu verwendet, neue Kombinationen von Teillösungen zu finden. Die Teleologie spielt hierbei eine untergeordnete Rolle.

Axiomatic Design nach SUH

Ein weiterer nordamerikanischer Ansatz ist die *Axiomatic Design Theory* nach SUH¹⁴⁴. In diesem Ansatz werden die Wechselwirkungen von vier Bereichen zwischen Kundenanforderung und Herstellung (Abbildung 15) mit berücksichtigt.

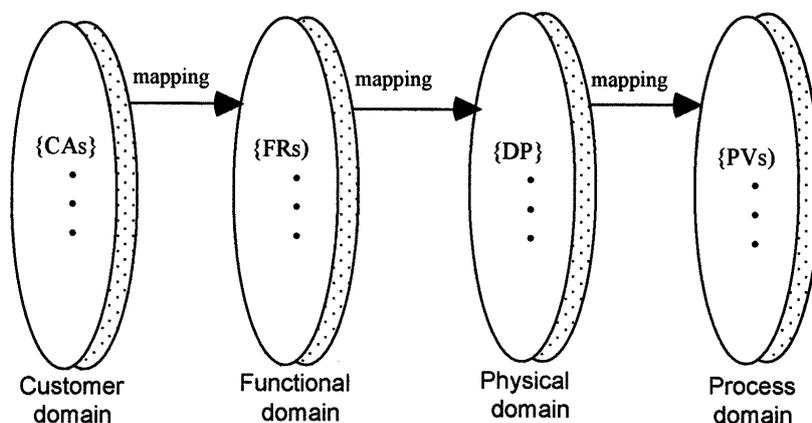


Abbildung 15: „Domains“ von Axiomatic Design¹⁴⁵

Der Gestaltungsprozess spielt sich zwischen der *Functional Domain* und der *Physical Domain* ab, die Intentionsbeschreibung befindet sich in der *Customer Domain*.

So hat die Festlegung eines *Design Parameters* (DP), der ein *Functional Requirement* (FR, engl. Funktionsanforderung) erfüllen soll, Einfluss auf die Festlegung weiterer *Functional Requirements*. Der Gestaltungsprozess verläuft hin und her („zig-zagging“) zwischen Funktion und Gestalt. Die Beeinflussung bereits festgelegter Lösungen auf das weitere Vorgehen wird also explizit modelliert, da jede Entscheidung neue Ziele entstehen lässt. Auf Basis dieser Darstellung lässt sich auch hier feststellen, dass im Axiomatic Design in der *Functional Domain* das Verhalten des Systems abgebildet wird und somit auch hier unterschiedliche Bedeutungen von Funktion mit einer Beschreibung bedient werden müssen.

¹⁴⁴ (Suh, 1990)

¹⁴⁵ Ebd.

Axiomatic Design gibt den Entwicklungsablauf nicht streng vor, sondern bietet die Möglichkeit, den Ablauf problemangepasst darzustellen. Für die Modellierung der entlang des Prozesses entstehenden Objekte sieht Axiomatic Design allerdings nur qualitative Beschreibungen vor. Dieser Sachverhalt wurde in der Abhandlung von ALBERS¹⁴⁶ ausführlich behandelt.

Function Behavior Structure Ontologie nach GERO¹⁴⁷

GERO diskretisiert den Raum zwischen Funktion und Beschreibung der Gestalt eines technischen Systems und zeigt damit einen Gestaltungsprozess auf, der nicht vorschreibend, sondern beschreibend¹⁴⁸ ist.

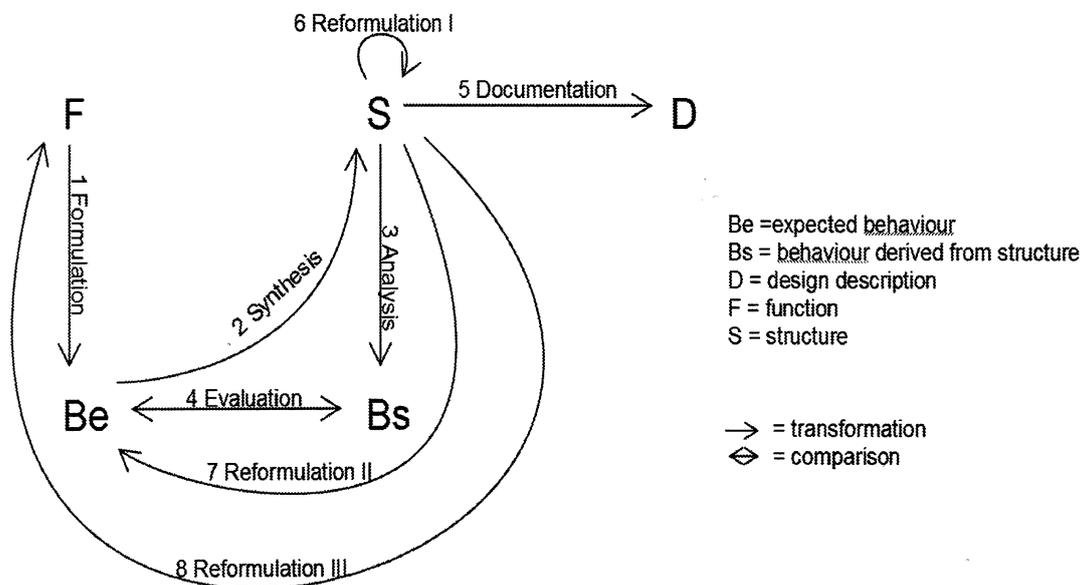


Abbildung 16: F-B-S Ontologie¹⁴⁹

Abbildung 16 zeigt die 5 Abstraktionen zwischen Funktion (F) und Beschreibung eines technischen Systems (D). Der Ausdruck „Be“ steht für das „zu erwartende Verhalten der Gestalt“ (engl. expected behaviour), Bs (engl. behaviour derived from structure) beschreibt das „tatsächliche Verhalten der Gestalt“ und S (engl. structure) beschreibt die Gestalt an sich. Diesen diskreten Schritten werden jeweils Aktivitäten zugeordnet. Der Gestaltungsprozess ergibt sich aus der Abfolge der Aktivitäten. Bei dieser Methode ist der Gestaltungsprozess gekennzeichnet durch eine individuelle

¹⁴⁶ (Marques, et al., 2009)

¹⁴⁷ (Gero, 1990)

¹⁴⁸ In der Konstruktionsmethodik wird zwischen beschreibenden und vorschreibenden Ansätzen unterschieden. Die beschreibenden haben ausschließlich erklärenden Charakter, wohingegen die vorschreibenden den Anspruch haben Anleitung zu geben. Siehe bspw. (Blessing, 1994)

¹⁴⁹ (Gero, et al., 2002)

Abfolge von Analyse-, Synthese-, Formulierungs- und Reformulierungsschritten, die bei GERO als *Transformation* und *Vergleich* beschrieben werden¹⁵⁰.

2.3.6 Kritik an der Diskretisierung zwischen Zielen und Gestalt

Kritik an normativ- vorschreibenden Vorgehensweisen wurde durch Beobachtung von Entwicklungsprozessen in Unternehmen zum Beispiel von RITTEL¹⁵¹ begründet. Das logisch-schrittweise Vorgehen der Konstruktionsmethodik entspricht nicht dem menschlichen individuellen Vorgehen¹⁵² und ist deswegen nicht intuitiv anwendbar¹⁵³. Das menschliche Gehirn arbeitet sprunghaft, assoziativ über Ketten von Bildern und Begriffen¹⁵⁴. Der vorschreibende „Zwangsjacken-Charakter“¹⁵⁵, der durch die Festschreibung der Abstraktionsebenen entsteht, gibt dem Konstruieren zwar einen Rahmen, die oftmals sequenziell aufgebauten Ablaufschemata in den Prozessmodellen beinhalten jedoch keine Iteration¹⁵⁶. Des Weiteren können die Ausgangsinformationen des Konstruktionsprozesses die zur Problemlösung notwendigen Informationen nicht zu Beginn enthalten. Dies wird jedoch bei algorithmischem Vorgehen¹⁵⁷ vorausgesetzt. Die Klärung der Problemstellung ist notwendigerweise an die Konkretisierung der Lösung gebunden¹⁵⁸. Forderungen, soziale und psychische Faktoren und die Denkweise des Menschen stärker mit in den Entwicklungsprozess einzubeziehen, wurden unter anderem von FRANKE¹⁵⁹ geäußert.

Das Vorgehen von Ingenieuren bei der Lösung von Gestaltungsproblemen ist gekennzeichnet durch sprunghaften Fortschritt¹⁶⁰. Der Prozess verläuft sprunghaft in Bezug auf Abstraktion und Konkretisierung sowie Synthese und Analyse.

In der Weiterentwicklung der Ansätze wurden diese Erkenntnisse zum Teil mit berücksichtigt. Auszugsweise werden im Folgenden zwei Ansätze beschrieben. Erstens haben PAHL und BEITZ selbst Kritik an gängigen Modellen geübt und ließen diese auch in die Weiterentwicklung der Konstruktionslehre einfließen und zweitens wird der Ansatz Characteristics-Properties-Modelling (CPM) von WEBER präsentiert.

¹⁵⁰ (Gero, et al., 2002), (Gero, 1990)

¹⁵¹ (Rittel, 1980)

¹⁵² (Schregenberger, 1980)

¹⁵³ (Schregenberger, 1980)

¹⁵⁴ (Jorden, 1983)

¹⁵⁵ (Müller, 1990)

¹⁵⁶ (Lossack, 2004)

¹⁵⁷ (Müller, 1990)

¹⁵⁸ (Schregenberger, 1980), (Marples, 1961), (Asimov, 1962), (Simon, 1969) (Meboldt, 2008)

¹⁵⁹ (Franke, 1995)

¹⁶⁰ (Ehrlenspiel, 2003), (Eckert, et al., 2004b), (Dörner, 1976)

2.3.6.1 Konstruktionslehre nach PAHL und BEITZ

EHRENSPIEL und PAHL waren die Initiatoren für die Erforschung der Konstruktionsabläufe durch empirische Studien. Sie führten Projekte in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus der Psychologie durch.

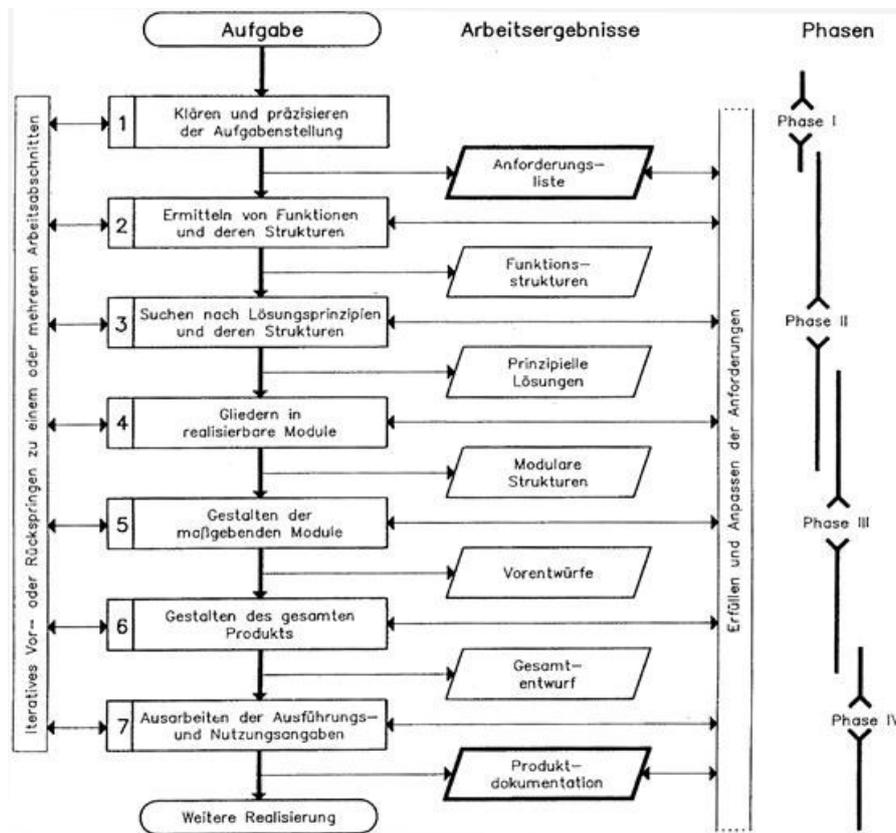


Abbildung 17: Vorgehensmodell nach PAHL UND BEITZ¹⁶¹

In der Serie des LADENBURGER DISKURSES¹⁶² entstanden Forschungsarbeiten, die explizit psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren erörtern. Die gewonnenen Erkenntnisse verwendeten PAHL und BEITZ um das in Abbildung 17 gezeigte Prozessmodell zu entwickeln, welches explizit mehrstufige Iterationen vorsieht. Somit entwickelten sie ein Modell, aus dem sich spezifische Modelle ableiten lassen. PAHL und BEITZ teilten aber nach wie vor den Übergang zwischen Zielen und Gestalt in dieselben diskreten Schritte ein. Das Spektrum setzt sich weiterhin aus Funktionen, physikalischen Effekten, Wirkprinzipien und Gestaltung zusammen. Die Konsequenzen aus den Erkenntnissen der Zusammenarbeit mit psychologischen Forschungseinrichtungen finden allerdings nur langsam Eingang in das methodische Konstruieren und wirken sich bisher nicht auf die entlang des Produktentwicklungsprozesses entstehenden Modelle aus.

¹⁶¹ (Pahl, et al., 2003 und 2005)

¹⁶² (Pahl, 1994)

Nach PAHL und BEITZ ist eine Funktion eine gewollte Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel eine gewollte Aufgabe zu erfüllen. Die Eingang/Ausgangsbeziehung beschreibt eine Transformation von Material Energie und Information, d. h. sie unterscheiden nicht zwischen Zweck und Verhalten (erwartet oder tatsächlich).

2.3.6.2 Characteristics-Properties-Modelling (CPM) von WEBER

CPM¹⁶³ unterscheidet zwischen Verhalten eines Systems (engl. *properties*) und Struktur/Gestalt (engl. *characteristics*) eines technischen Systems. Das Verhalten kann vom Produktentwickler nur indirekt durch die Veränderung der Struktur¹⁶⁴ beeinflusst werden. Die Beziehungen zwischen Verhalten und Struktur eines Systems korrespondieren mit der Analyse und den Syntheseaktivitäten. In der Analyse ist die physikalische Struktur des Systems bekannt und mittels Relation (R) wird daraus das Verhalten abgeleitet. Umgekehrt verbindet die negative Relation (R-1) das Verhalten mit der Struktur in sogenannten Syntheseschritten. Der Produktentwicklungsprozess setzt sich zusammen aus vier Aktivitäten und wird in keiner Sequenz vorgegeben. Diese Aktivitäten werden sooft durchlaufen, bis das tatsächliche Verhalten dem gewünschten Verhalten entspricht¹⁶⁵. WEBER liefert hiermit ein Modell, das eine individuelle Abfolge von Schritten erlaubt. Die Einteilung beinhaltet allerdings zwei Schritte zwischen den Zielen und der Gestalt, die beide nicht den Zweck beschreiben. Wie Strukturelemente und Verhaltenselemente in anderen Modellen abgebildet werden können, wird nicht beschrieben. Der Ansatz beschreibt das Lösen von Gestaltungsproblemen rein theoretisch. Beispiele sind nicht zu finden.

2.3.7 Zwischenfazit

Die vielen unterschiedlichen, in der Literatur vorhandenen Auffassungen von Funktion, haben immer eine unterschiedliche Reichweite in der Bedeutung. Die Einteilung in unterschiedliche Abstraktionsebenen zwischen Zielen und Gestalt ist daher einerseits sinnvoll und hilfreich, da Beschreibungsmittel für unterschiedliche Situationen zur Verfügung stehen. Andererseits scheint es so, als ob die notwendige Beschreibung des Produktes oftmals einer formalen Konvention der Beschreibungsform zum Opfer fällt. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Funktion „Stoff leiten“ als Beschreibung der Funktion eines Wagenhebers¹⁶⁶. Die Konvention, die

¹⁶³ (Weber, 2008)

¹⁶⁴ Unter Struktur versteht WEBER das, was in der vorliegenden Arbeit als Gestalt bezeichnet wird.

¹⁶⁵ (Tomiya, et al., 2009)

¹⁶⁶ (VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 1997), S.18

Funktion immer abstrakt, lösungsneutral und mit zwei Worten zu formulieren, nimmt dem Anwender die Möglichkeit, die unterschiedlichen Sichtweisen auf das zu entwickelnde Produkt zu beschreiben. Hierbei ist zu beachten, dass die Konvention lediglich für einen bestimmten Anwendungsfall (Entwicklung von Lösungsprinzipien) erstellt wurde. Die Verwendung unterschiedlicher Abstraktionen ist jedoch notwendig und eng mit den während des Gestaltungsprozesses auftretenden Problemen verknüpft. In der vorliegenden Arbeit wird durch Beobachtung realer Abläufe gezeigt, dass diese unterschiedlichen Abstraktionen benötigt werden und dass die Einhaltung von Konventionen zur Darstellung von Funktion Schwierigkeiten verursacht.

2.4 Contact and Channel Ansatz

In diesem Kapitel wird zunächst die Systematik des C&C-Ansatzes erklärt, die mit einer Betrachtung der zugrunde liegenden Grundhypothesen einhergeht. Danach wird ein Abriss über die Entwicklung des C&C-Ansatzes¹⁶⁷ gegeben. Hierin wird beschrieben, dass aus dem ursprünglichen C&C-Ansatz ein generischer Ansatz entstanden ist, mit dem es möglich ist, Funktion und Gestalt mechatronischer Systeme¹⁶⁸ zu beschreiben. Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird die Betrachtung des Standes der Forschung zum C&C-Ansatz auf das Vorgehen beim Lösen von Gestaltungsproblemen fokussiert und mit einer Beschreibung des Konzeptes von Funktion im C&C-Ansatz abgeschlossen.

2.4.1 Systematik des C&C-Ansatzes

Dem C&C-Ansatz liegen drei Grundhypothesen¹⁶⁹ zugrunde:

Grundhypothese 1: ein Effekt¹⁷⁰ (z. B. Reibung, Keileffekt, Kraftübertragung, Informationsübertragung, ...) kann nur dann stattfinden, wenn eine Wirkfläche (WF) in Kontakt mit einer weiteren Wirkfläche steht, d. h. ein Wirkflächenpaar (WFP) bildet.

Grundhypothese 2¹⁷¹: Die Funktion eines technischen Systems wird durch mindestens 2 WFP und sie verbindende Leitstützstrukturen erfüllt.

Grundhypothese 3: Ein technisches System ist beschreibbar durch eine Struktur von WFP und LSS.

¹⁶⁷Es wird eine Unterscheidung zwischen C&C-Ansatz und C&C-Modell eines technischen Systems vorgenommen. Mit C&C-Ansatz wird derjenige Teil bezeichnet der allgemein gültig ist und aus dem C&C-Modelle technischer Systeme gebildet werden. C&C-Modelle sind also immer etwas Spezifisches

¹⁶⁸ Hierzu zählen Mechanik, Elektrotechnik, Elektronik und Software

¹⁶⁹Grundhypothesen in der ersten Version in (Matthiesen, 2002): **Grundhypothese I:** Jedes Grundelement eines technischen Systems erfüllt seine Funktion durch eine Wechselwirkung mit mindestens einem anderen Grundelement. Die eigentliche Funktion - und damit die gewünschte Wirkung - wird erst durch den Kontakt einer Fläche mit einer anderen Fläche möglich. Diese Flächen sind Wirkflächen und bilden zusammen ein Wirkflächenpaar. **Grundhypothese II:** Die Funktion eines technischen Systems oder eines technischen Teilsystems wird grundsätzlich über mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur verwirklicht. Funktionsbestimmend sind dabei allein die Eigenschaften und Wechselwirkungen der beiden Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstruktur. Spielen Felder für die Funktionserfüllung eine Rolle, so ist die Wechselwirkung der Leitstützstruktur des Feldes mit mindestens zwei weiteren Leitstützstrukturen zusätzlich funktionserfüllend. **Grundhypothese III:** Jedes System, das Funktionen erfüllt, besteht aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur, die in beliebiger Anzahl, Anordnung und Form auftreten können. Ein Wirkflächenpaar setzt sich aus genau zwei Wirkflächen zusammen

¹⁷⁰Die Grundhypothesen wurden 2008 durch ALBERS, MATTHIESEN und den Autor dieser Arbeit präzisiert (Albers, et al., 2008b): In der Version von (Matthiesen, 2002) wird beispielsweise der Effekt ebenfalls als Funktion bezeichnet, so dass hier ein scheinbarer Widerspruch vorlag. genauere Betrachtung hierzu folgt in Abschnitt

¹⁷¹ Die Grundhypothese 2 aus (Albers, 2010)

Der Kugelschreiber in Abbildung 18 erfüllt die Funktion *Schreibinformation auf Papier visualisieren*, wenn das WFP0.2¹⁷² zwischen Hand und Kugelschreiber und das WFP0.1 zwischen Papier und Kugelschreiber existieren. Zusätzlich ist für die Funktionserfüllung noch die WFP0.1 und WFP0.2 verbindende Leitstützstruktur LSS0.1/0.2, notwendig (Grundhypothese 2). Die Funktion *Schreibinformation auf Glas visualisieren* ist mit einem Kugelschreiber nicht möglich, da im notwendigen WFP0.1 kein Effekt stattfindet. Die reduzierte Beschreibung mit Wirkflächen auf der ersten Ebene (Abbildung 18, links) kann zunächst nicht erklären, warum die Funktion in diesem Fall nicht erfüllt wird. Abbildung 18-rechts zeigt, dass diese Systematik auf verschiedenen Detaillierungsebenen gleichermaßen anwendbar ist (Grundhypothese 3). Alle Teilfunktionen können mit der Methode abgebildet und in Bezug zueinander gesetzt werden.

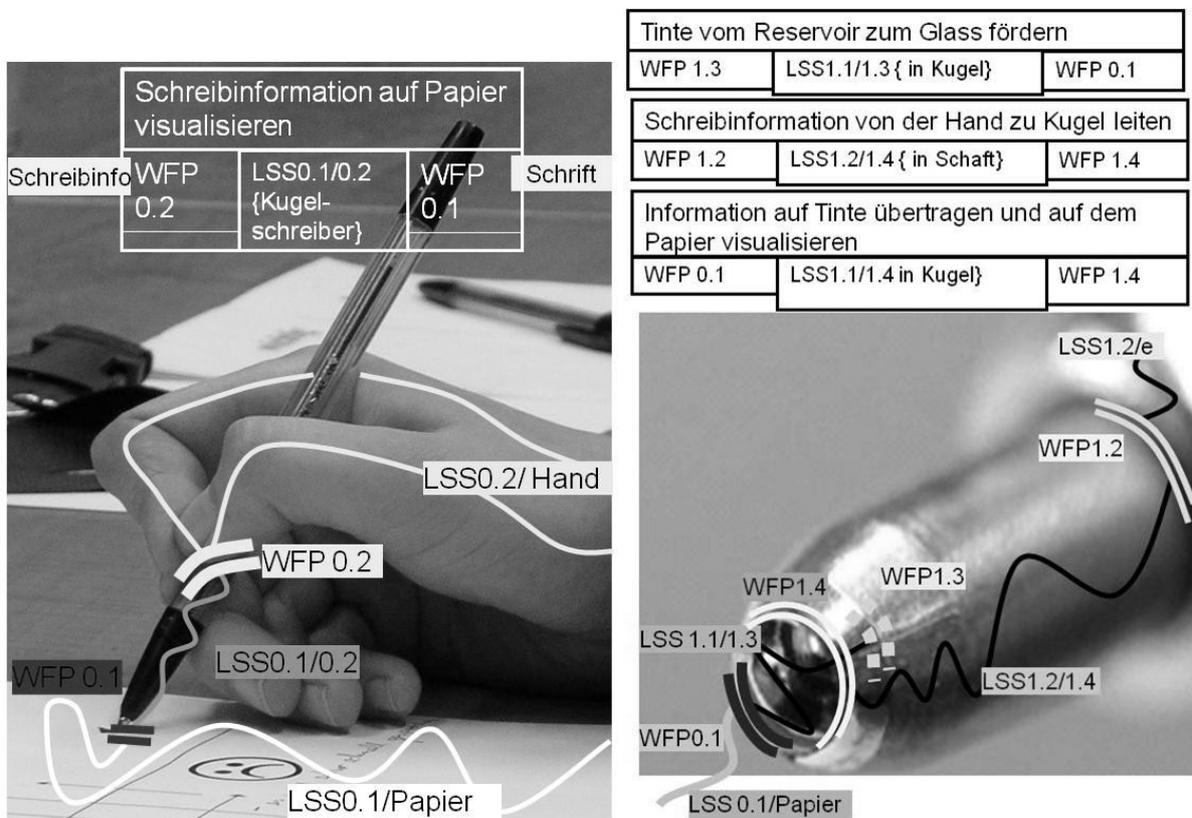


Abbildung 18: C&C-Modell eines Kugelschreibers¹⁷³

WFP und LSS sind sowohl auf der abstrakten Ebene der Funktionsbeschreibung als auch auf der konkreten Bauteilebene stets beschreibbar. Somit ist es möglich,

¹⁷² Die Benennung von WFP und LSS wurde von Albers und dem Autor der vorliegenden Arbeit in (Albers, et al., 2007c) vorgeschlagen: Die Nummerierung ist stets 2-Stellig. Die erste Ziffer beschreibt die Hierarchieebene auf der das WFP identifiziert wird. Die zweite Ziffer beschreibt die laufende Nummer des WFP auf einer Hierarchiestufe. Beim Wechsel der Hierarchiestufe wird ein WFP nicht neu benannt. WFP0.1 auf der ersten Ebene bleibt WFP01. Auch auf der zweiten Ebene.

¹⁷³ (Albers, et al., 2008c)

Wirkzusammenhänge einer Funktion bildlich darzustellen und ihnen konkrete Orte zuzuweisen.

Den Studien¹⁷⁴, die in dieser Arbeit durchgeführt und ausgewertet wurden liegt eine bereits überarbeitete Version der Grundhypothesen zu Grunde¹⁷⁵. Diese Studien wurden im Zeitraum von Anfang 2006 bis Mitte 2009 bearbeitet und anschließend ausgewertet. 2009 ist von ALBERS die Grundhypothese 2 präzisiert und umformuliert worden. Die Präzisierung der Grundhypothese 2 bezieht sich auf die Leitstützstrukturen: Hintergrund dessen ist die Relation zwischen Zielen und Funktion, die es erfordert, die Umgebung, in der ein System seine Funktion erfüllt, explizit zu berücksichtigen. ALBERS¹⁷⁶ modifiziert die Grundhypothese hin zu „**Die Funktion eines technischen Systems wird über mindestens zwei WFP und sie verbindende Leitstützstrukturen erfüllt**“.

Diese Präzisierung konnte für die Durchführung der Studien in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden. In Kapitel 7 wird diese Präzisierung jedoch für die Schlussfolgerungen aufgegriffen.

2.4.2 C&C-M und C&C-Ansatz

Mit dem C&C-Ansatz werden C&C-Modelle technischer Systeme gebildet. Mit dem C&C-Ansatz werden die allgemeinen Elemente bereitgestellt, um spezifische Modelle abzuleiten. Der C&C-Ansatz wurde und wird von der Gruppe um ALBERS, zu denen auch der Autor dieser Arbeit zählt, entwickelt, um Abstraktionen des Begriffes Funktion auf der Gestalt des Systems zu beschreiben. So werden die abstrakten Beschreibungen greifbarer.

Bereits RODENACKER¹⁷⁷ suchte nach Elementen zur Beschreibung technischer Sachverhalte, die in allen Bereichen des Ingenieurwesens anwendbar sind. Auch ROTH¹⁷⁸ und ERSOY¹⁷⁹ beschreiben mit Wirkfläche, Wirkflächenpaar und Wirkraum Elemente, um Modelle zu bilden, die eine Beziehung zwischen Funktion und Gestalt herstellen. Für den C&C-Ansatz werden ähnliche Begriffe verwendet, jedoch liegt diesem die Interpretation der Konstruktion als heuristisches Verfahren¹⁸⁰ zugrunde.

¹⁷⁴ Kapitel 5 und Kapitel 6

¹⁷⁵ Zur Erfüllung einer technischen Funktion muss mindestens ein weiteres Wirkflächenpaar existieren, das durch eine Leit-Stütz-Struktur (LSS) mit dem ersteren verbunden ist. Eine technische Funktion ist jede Funktion (Verhalten eingeschlossen), die der Input/Output Beziehung der Größen Material, Energie und Information entspricht, aus (Albers, et al., 2007)

¹⁷⁶ (Albers, 2010), S. 6

¹⁷⁷ (Rodenacker, 1970)

¹⁷⁸ (Roth, 1994)

¹⁷⁹ (Ersoy, 1975)

¹⁸⁰ Siehe vorangehende Abschnitte

Es wird davon ausgegangen, dass in der Produktentwicklung immer menschliche Kreativität, Intuition und Denkvermögen benötigt werden.

Der C&C-Ansatz hat sich seit der ersten Nennung durch ALBERS¹⁸¹ stetig weiter entwickelt. Ursprünglich wurde dieser als eine Beschreibungsform für Funktion auf der Gestalt entwickelt, um das Verständnis Studierender für die Funktionen klassischer Maschinenelemente in der Maschinenkonstruktionslehre zu fördern. Die von ALBERS und MATTHIESEN zum Thema publizierten Arbeiten¹⁸² beschreiben den C&C-Ansatz im Zusammenhang mit dem Karlsruher Lehrmodell für Produktentwicklung. Die Anwendung des C&C-Ansatzes in der Lehre für Maschinenkonstruktion wurde evaluiert und ausgewertet¹⁸³. Die Ergebnisse zeigen große Fortschritte in der Fähigkeit der Studierenden, die Funktionen eines unbekanntes technischen Systems zu antizipieren. In weiteren Arbeiten wurde von ALBERS ET AL.¹⁸⁴ an Prinzipien gearbeitet, um die Synthese technischer Systeme mit dem C&C-Ansatz weiter zu verbessern. 2004 veröffentlichten ALBERS und ECKERT¹⁸⁵ erstmals Arbeiten, die sich explizit mit den kognitiven Vorgängen bei Produktentwicklern beim Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz beschäftigen. In diesem Zusammenhang untersuchte der Autor dieser Arbeit unter Anleitung von ALBERS und ECKERT¹⁸⁶ wie mithilfe des C&C-Ansatzes bessere Produktmodelle zur Vorhersage der Auswirkungen von Änderungen in komplexen technischen Systemen erstellt werden können. Anlass hierfür war, dass bisherige, der Methode zugrunde gelegte Modelle des Systems stark subjektiv beeinflusst sind. Ansatz ist mit C&C-Modellen systematisch Bauteilverknüpfungen über eine funktionale Betrachtung des Systems herauszuarbeiten, anstatt, wie bisher direkt die Komponentenverbindungen als Grundlage der Vorhersage der Auswirkungen von Änderungen benennen.

Während die Vorhersage der Auswirkungen von Änderungen ein eigenes Anwendungsgebiet ist, wird der C&C-Ansatz vorrangig eingesetzt, um Gestaltungsprobleme zu lösen. In viele Arbeiten zeigen ALBERS und SEINE MITARBEITER¹⁸⁷, dass die Anwendung des C&C-Ansatzes zur zielgerichteten und

¹⁸¹ (Albers, et al., 1999), (Albers, et al., 2002)

¹⁸² (Albers, et al., 1999) (Albers, et al., 2000) (Albers, et al., 1999b)

¹⁸³ (Albers, et al., 2003), (Albers, et al., 2003b)

¹⁸⁴ (Albers, et al., 2003c), (Albers, et al., 2004b) (Albers, et al., 2005)

¹⁸⁵ (Eckert, et al., 2004b)

¹⁸⁶ (Keller, et al., 2007)

¹⁸⁷ Beispielsweise: (Albers, et al., 2007), (Stuffer, 2007), (Hauser, 2007), (Behrendt, 2009), (Karrar, 2008; Mitariu-Faller, 2009), (Schyr, 2006), (Ohmer, 2008)

effizienten Vorgehensweise beiträgt. In Forschungsworkshops¹⁸⁸ wurden die Anwendungen am IPEK¹⁸⁹ diskutiert und zukünftige Forschungsthemen herausgearbeitet. So entwickelte der Autor dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit MATTHIESEN, ALBERS und THAU eine Vorgehensweise¹⁹⁰ zum Lösen von Gestaltungsproblemen. Diese basiert auf der von ALBERS vorgestellten SPALTEN¹⁹¹ Methode, deren Grundlagen in weiteren Arbeiten¹⁹² von ALBERS und dem Autor der vorliegenden Arbeit aufgearbeitet und auf den C&C-Ansatz übertragen wurden.

Das Lösen von Gestaltungsproblemen ist ein Anwendungsbereich unter anderen. Weitere sind beispielsweise die Entwicklung von Validierungsumgebungen¹⁹³ und die Kopplung von Simulationswerkzeugen¹⁹⁴. So entwickeln ALBERS und SCHYR¹⁹⁵ den *erweiterten C&C-Ansatz*, der eine Erweiterung um Elemente zur physikalischen Beschreibung der Eigenschaften von WFP und LSS beinhaltet. Auf dieser Basis wird der C&C-Ansatz für die Entwicklung komplexer Validierungsumgebungen für Fahrzeuge verwendet. Die unterschiedlichen Komponenten einer Validierungsumgebung werden als C&C-Modell beschrieben. Diese unterschiedlichen Komponenten sind beispielsweise die Funktion des *realen* Fahrers¹⁹⁶ oder dessen *physikalische Modellierung*. Es können so also Elemente der Softwaretechnik in Zusammenhang mit rein mechanischen Teilsystemen beschrieben werden.

ALBERS, ENKLER und OTTNAD¹⁹⁷ benennen den *generalisierten C&C-Ansatz*. Hierbei stellt der „C&C-Ansatz die grundlegenden Prinzipien zur Analyse und Beschreibung technischer Systeme bereit. Der generalisierte Ansatz liefert einen Beitrag zur Auswahl von Simulationsprozessen“¹⁹⁸. In diesen Arbeiten wird beschrieben, dass die Schnittstellen zwischen Softwarewerkzeugen für die Simulation mittels WFP beschrieben werden können. Dies ermöglicht eine effektive Auswahl und Kopplung einer Simulationswerkzeugkette, die bisherige Schwachstellen von Insellösungen überwindet.

¹⁸⁸ Deren Ergebnisse für die vorliegende Arbeit ebenfalls in Kapitel 5 ausgewertet wurden.

¹⁸⁹ Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie

¹⁹⁰ (Albers, et al., 2008b), (Albers, et al., 2008)

¹⁹¹ Siehe Abschnitt 2.2.2, S.17

¹⁹² (Albers, et al., 2007c), (Albers, et al., 2008c)

¹⁹³ (Albers, et al., 2010b)

¹⁹⁴ Albers und (Enkler, 2010) und (Albers, et al., 2009b)

¹⁹⁵ (Albers, et al., 2009b), (Enkler, 2010), (Ott nad, 2009)

¹⁹⁶ (Albers, et al., 2010b)

¹⁹⁷ (Albers, et al., 2007)

¹⁹⁸ (Albers, et al., 2009b), S. 6

Aus dem ursprünglichen C&C-Modell wurde ein generischer Ansatz¹⁹⁹ mit dem sich Funktion und Gestalt technischer Systeme aufeinander beziehen lassen. Wurden anfangs ausschließlich mechanische Systeme betrachtet, so wird von ALBERS heute unter Gestalt ebenfalls die Gestalt von Software verstanden. Der Begriff der Gestalt bezieht sich bei ALBERS nicht mehr nur auf die stofflichen und geometrischen Eigenschaften von Körpern, sondern auch auf Quellcode der in einem Rechner eine Funktion erfüllt und übergeordnet zu einer Hauptfunktion beiträgt. Diese Funktion ist beispielsweise die Steuerung eines angeschlossenen Gerätes²⁰⁰ mittels Steuersignal oder aber auch die Anzeige der Spannungszustände in einem Bauteil die von einem FEM-System berechnet werden.

2.4.3 C&C-M beim Lösen von Gestaltungsproblemen

Die vorstehenden Abschnitte zeigen den gesamten Umfang der Forschungsarbeiten am C&C-Ansatz. In diesem Abschnitt wird auf das Lösen von Gestaltungsproblemen fokussiert, wie es von ALBERS und dem Autor der vorliegenden Arbeit 2007 vorgestellt wurde²⁰¹. Im nachfolgenden Abschnitt wird dieses Vorgehen ausführlich dargestellt, da es die Grundlage für das Vorgehen in allen Studien²⁰² dieser Arbeit bildet.

Allen Studien, die in dieser Arbeit ausgewertet wurden, liegen die Merkmale erfolgreicher Problemlösungsprozesse zugrunde, wie sie im von ALBERS bereitgestellten SPALTEN Modell²⁰³ beschrieben sind. Beim Lösen von Gestaltungsproblemen sollte der Synthese eine Analyse vorangehen, um das Problem einzugrenzen und somit den auszufüllenden Lösungsraum zu bestimmen. Diese Beschreibung eines technischen Systems mit dem C&C-Ansatz kann auf sehr unterschiedlichen Detaillierungsebenen geschehen. Abhängig von Problemstellung und Kontext, kann ein System bei gleichen Hilfsmitteln und Vorgehensweisen beliebig detailliert, aber auch sehr grob als „Blackbox“ betrachtet werden. Die Tiefe der Analyse zur Bestimmung des Problems kann so an die Randbedingungen des Projektes (z. B. Ziele, Zeit, Ressourcen, Qualität) angepasst werden.

¹⁹⁹ (Tomiya, et al., 2009)

²⁰⁰ (Albers, et al., 2010b)

²⁰¹ (Albers, et al., 2007)

²⁰² Siehe Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6

²⁰³ (Albers, et al., 2005) Und Abschnitt 2.2.2

Um dieses Vorgehen für Studierende und Anwender des C&C-Ansatzes leicht lernbar zu gestalten, wurde auf Basis der veröffentlichten Arbeiten²⁰⁴ ein Beispiel generiert. Dieses Beispiel wird im Folgenden ausführlich beschrieben:

Es wird hierzu angenommen, dass in einem Unternehmen die Weiterentwicklung eines Hochentasters (HT) (Abbildung 19) vorangetrieben werden soll. Dies wird durch zwei Aspekte der Kundenzufriedenheit motiviert:

- Die Schneidleistung des Sägekopfes und dessen Lebensdauer werden bemängelt.
- Das Arbeiten mit dem Hochentaster ist ermüdend, sodass die Anwender Pausen einlegen müssen. Dies ist besonders für den professionellen Einsatz unerwünscht.

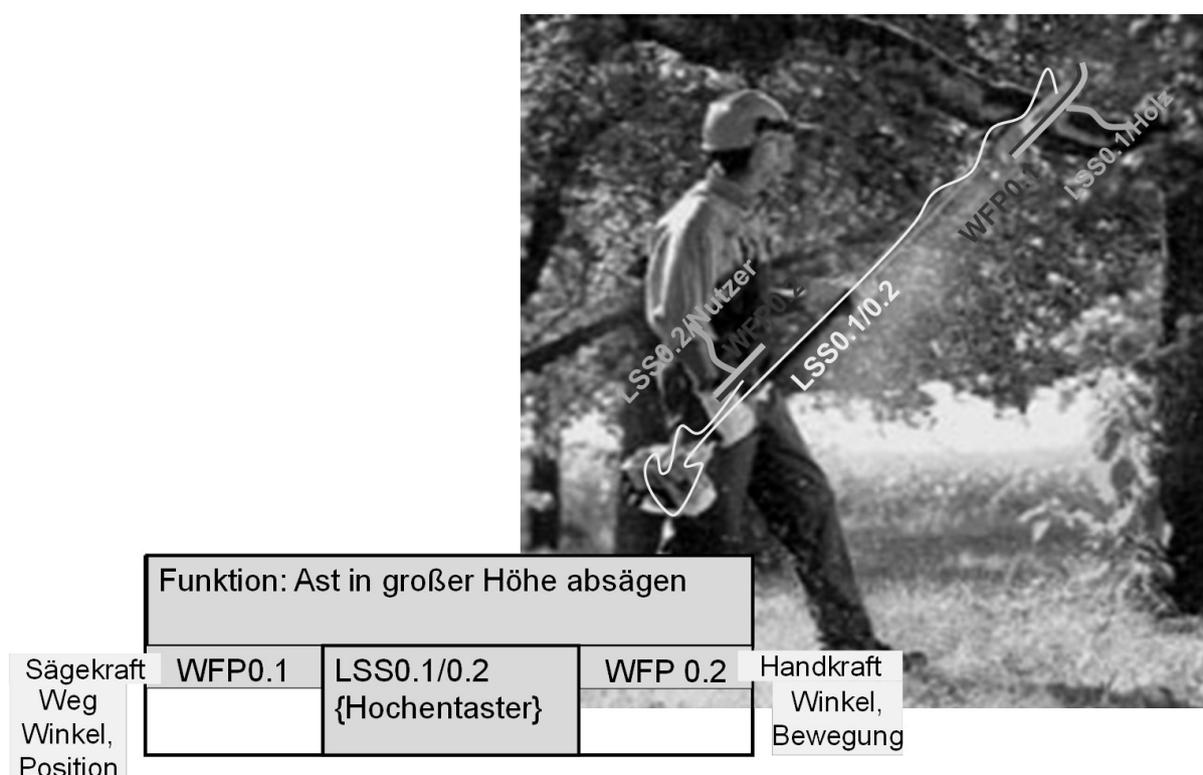


Abbildung 19: Hauptfunktion des Hochentasters²⁰⁵

Von der Unternehmensleitung wird ein Team von Produktentwicklern damit beauftragt, diese Probleme anzugehen:

Um die Probleme einzugrenzen wird ausgehend von der Hauptfunktion des Hochentasters und damit von den WFP0.1, WFP0.2 und der LSS1/2 wird das bestehende System zunächst analysiert, um die Probleme einzugrenzen.

²⁰⁴ (Albers, et al., 2005), (Albers, et al., 2008b), (Albers, et al., 2008), (Albers, et al., 2008c), (Albers, et al., 2007)

²⁰⁵ (Albers, et al., 2010)

Für die Entwickler gilt es zuerst zu verstehen, warum die Arbeit mit dem Hochentaster ermüdend ist. Hierzu müssen sie ebenfalls die Modellierung verfeinern, d. h. der Bereich der die Funktion „Äste in großen Höhen absägen“ (WFP0.1, WFP0.2, LSS0.1/0.2, in Abbildung 19) erfüllt, muss detaillierter betrachtet werden. Diese Analyse wird mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt und führt zu Hypothesen für Ursachen der auftretenden Probleme. Beispielsweise werden Anwender des Hochentasters beobachtet (Abbildung 20), eine Messung der auftretenden Kräfte im System durchgeführt oder die Kinematik simuliert. Das Problem der *Ermüdung der Anwender* (nach zwei Stunden Arbeiten mit dem HT muss eine längere Pause eingelegt werden) wird dem WFP0.2 und der LSS0.1/0.2 des Hochentasters zugeordnet. Die Anwendung des Gerätes wirkt aufgrund der Masse der LSS0.1/0.2²⁰⁶ und der Kraft, die durch WFP0.2 zum Anwender geleitet wird, ermüdend. Damit ist das Problem auf das zu hohe Gewicht eingegrenzt²⁰⁷. Eine mögliche Lösung wäre dann, das Gewicht zu reduzieren und somit auch die auf den Anwender wirkende Kraft zu minimieren. Die Sägeeinheit (WFP0.1) und die Teleskopstange mit Antrieb (LSS0.1/0.2) haben geringeren Einfluss auf die Qualität der Gesamtfunktion in Bezug auf dieses Problem als die Schnittstelle zum Anwender (WFP0.2). Da eine Reduzierung des Gewichtes zu viele Änderungen mit sich bringen würde, wird von den Entwicklern entschieden, dass dies nicht umgesetzt werden kann. Deshalb wird der Fokus für die Analyse der Ermüdung in Bezug auf die Gestalt des WFP0.2 gesetzt.

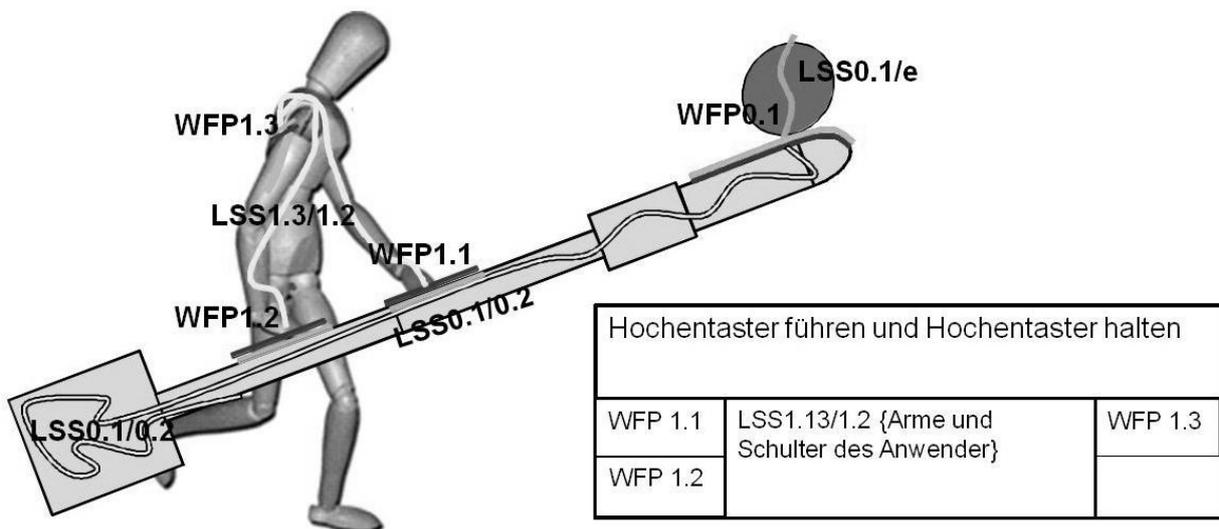


Abbildung 20: Verfeinertes C&C-M des Systems

²⁰⁶ Zur weiteren Verdeutlichung der Grundhypothesen: Diese LSS existiert nur, wenn das Gerät angewendet wird. Nur dann wird die Funktion erfüllt und nur dann kann auch Ermüdung stattfinden

²⁰⁷ Dies ist eine zuvor aufgestellte und durch die Versuche verifizierte Hypothese

Als Resultat wird ein neuer SOLL-IST Unterschied festgeschrieben, der die Produktentwicklung anstößt: Der Anwender muss in der Lage sein, vier Stunden ohne Pause über Kopf zu arbeiten. Die verfeinerte Analyse von WFP0.2 in Abbildung 20 zeigt, wie der Hochentaster bisher gehalten wird. Um den Hochentaster effizient anzuwenden zeigt sich hier dann im Speziellen, dass zwei Funktionen vom Anwender erfüllt werden müssen: „Hochentaster halten“ und „Hochentaster führen“. Die Ermüdung des Anwenders tritt maßgeblich durch die Funktion „Hochentaster halten“ ein. Bisher erfüllt der Anwender beide Funktionen über WFP1.1, WFP 1.2 und WFP1.3 und die diese WFP verbindenden LSS (Abbildung 20). Indem in WFP1.5 die Muskulatur ungünstig beansprucht wird, tritt durch diese Anordnung der WFP und LSS die Ermüdung auf.

Ein möglicher Lösungsansatz ist daher, die beiden Funktionen zu trennen. In diesem Fall wäre dafür zu sorgen, dass die Gewichtskraft des Hochentasters derart zum Anwender übergeleitet wird, dass dieser erst nach der geforderten Zeit von vier Arbeitsstunden ermüdet. D. h., die Muskeln sollten in WFP1.5 auf eine andere Art beansprucht werden.

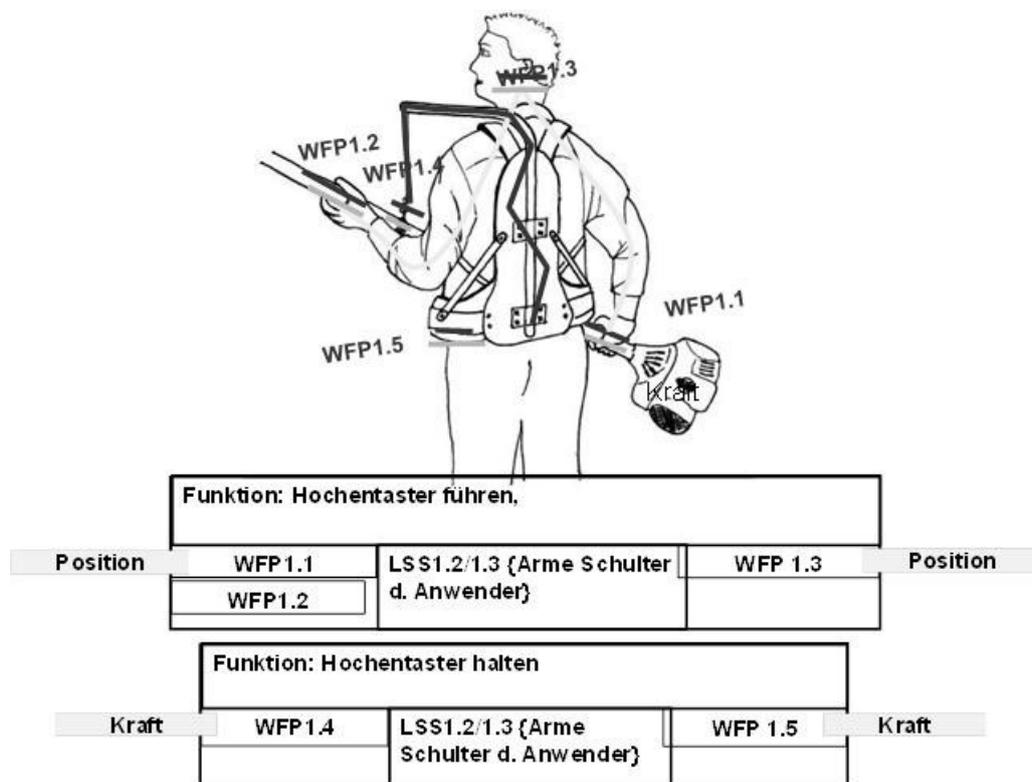


Abbildung 21: Tragesystem für den Hochentaster

Abbildung 21 zeigt das auf Basis dieser Erkenntnis entwickelte Tragesystem. Der größte Teil der Gewichtskraft wird über das Tragesystem auf die Hüfte des Anwenders übertragen. Durch die derartige Anordnung von WFP 1.3 und LSS 1.3/1.5 wird die Ermüdung bewirkende Kraft auf wesentlich günstigerem Wege zum Ort der Ermüdung (WFP1.5) geleitet. Der Anwender führt mit seinen Armen und

Händen dann die Funktion „Hochentaster führen“ aus, während die Funktion „Hochtaster halten“ von der Hüfte übernommen wird. WFP1.3 ist die Schnittstelle, an der die Arme Anweisungen des Gehirns erhalten den Hochentaster entsprechend zu bewegen. Diese Funktion ist eine reine Steuerungsfunktion, die durch Übertragung von Informationen erfüllt wird.

Die Entwickler wenden unterschiedliche Methoden an, um das Entwicklungsproblem zu klären. Es wurden Fotografien erstellt, anhand deren der Kraftfluss erörtert wird. Das erklärende Element sind Funktionen, die verbal beschrieben sind. Die Ergebnisse werden dann auf einer Prinzipienebene dargestellt, um weitere Erkenntnisse die zu einer weiteren Erklärung der Funktionen führen zu erhalten. Die Bestimmung der auftretenden Kräfte kann auch mit der Finite Element Methode, einer Mehrkörpersimulation oder in situ zum Beispiel durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erfolgen. Jede dieser Methoden verwendet unterschiedliche Abstraktionen zur Darstellung der Problematik. Mithilfe des C&C-Ansatzes sind die erörterten Sachverhalte durch WFP und LSS zueinander referenziert, da diese in allen Abstraktionen wiederzufinden sind. Dies ist sowohl auf einer Fotografie, in einer Funktionsbeschreibung, als auch in einem Finite Elemente Modell der Fall.

2.4.4 Das Konzept²⁰⁸ von Funktion im C&C-Ansatz

Unter einem Konzept von Funktion wird in dieser Arbeit nicht nur die Definition des Begriffs Funktion verstanden, sondern zusätzlich auch erläuternde Randbedingungen und Anweisungen zur Formulierung. MATTHIESEN²⁰⁹ führte ein Konzept von Funktionen für den C&C-Ansatz 2002 ein, das Funktion als „lösungsneutrale Beschreibung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems“ definiert. Diese Auffassung richtet sich nach der VDI Richtlinie 2221²¹⁰.

Die oben beschriebene Auffassung von Funktion schließt das Verhalten des Systems, das was das System tatsächlich bewirkt, explizit mit ein. Also wurde auch im C&C-Ansatz mit der Wahl dieser Definition von Funktion eine Unterscheidung zwischen Zweck und gewolltem beziehungsweise tatsächlichem Verhalten umgangen. Gleichzeitig wird eine Intention-beschreibende Auffassung von Funktion durch die auf das System bezogene Formulierung ausgeschlossen. In der VDI Richtlinie wurde als Zweck-beschreibendes Element die „Hauptfunktion“ benannt.

²⁰⁸ Als Konzept von Funktion wird hier, wie im weiteren Verlauf die Auffassung von Funktion verstanden, die sich aus der Bedeutung und der Notation der Darstellung und Formulierung zusammensetzt

²⁰⁹ (Matthiesen, 2002), S 46

²¹⁰ (VDI, 1993) S. 40

In den Arbeiten von ALBERS²¹¹ UND MATTHIESEN²¹² und dem Autor der vorliegenden Arbeit wird die in der VDI-Richtlinie beschriebene Definition weiterentwickelt. Vor allem wird als Kerngedanke immer wieder herausgestellt, dass Funktion nicht einen potenziellen Zustand beschreibt, sondern stattfindet. ALBERS und OERDING²¹³ und der Autor dieser Arbeit beschreiben 2010 explizit die Relation zwischen Funktion und Zielen als ein Steuerungselement für Produktentstehungsprozesse, jedoch wird noch nicht das volle von VERMAAS aufgezeigt Spektrum zwischen Zielen und Gestalt aufgezeigt. Dies wird mit der vorliegenden Arbeit adressiert.

Von MATTHIESEN wird bereits 2002 ein entscheidender Hinweis auf die Problematik der rigiden Definition von Funktion im Sinne der VDI 2221 gegeben. Er erstellt eine Anleitung zur Formulierung von Funktion in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2803²¹⁴ und empfiehlt das pragmatische Formulieren von Funktionen. Die Anwender werden angehalten, sich nicht auf die Wortwahl mit Nomen-Verb Kombination zu beschränken.

Mit der ursprünglichen Auffassung von Funktion im C&C-Ansatz²¹⁵ werden unterschiedliche Bedeutungen von Funktion abgedeckt. In den Arbeiten von Albers und MATTHIESEN²¹⁶ und ALBERS und OERDING²¹⁷ werden bereits Schritte unternommen, um den Begriff Funktion differenziert zu betrachten. Mit der vorliegenden Arbeit werden diese Unterscheidungen auf eine empirische Basis gestellt, indem untersucht wird, wie eine Vielzahl von Methodenanwendern beim Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem Begriff Funktion umgeht.

Explizite Darstellung von Funktion

Motivation für diese Arbeit ist die Schwierigkeit von Methodenanwendern Funktionen zu formulieren und auf die Gestalt zu beziehen. Bei der Durchsicht älterer veröffentlichter²¹⁸ Arbeiten zu C&C-M ist zu erkennen, dass die Orte, an denen Funktionen erfüllt werden, mithilfe der WFP und LSS sichtbar gemacht werden können. Jedoch wird in kaum einem C&C-Modell Funktion explizit formuliert und mit den WFP und LSS auf die Gestalt bezogen wird. Beispielsweise zeigt auch die Darstellung des C&C-Ansatzes in Abbildung 22 keine Funktion explizit. Dies wirft die

²¹¹ (Albers, et al., 2007) (Albers, et al., 2008c), (Börsting, et al., 2008)

²¹² (Albers, et al., 2008) (Albers, et al., 2008b)

²¹³ (Albers, et al., 2010)

²¹⁴ VDI Richtlinie 2803, Blatt 1, S.5, (VDI, 1996b)

²¹⁵ (Matthiesen, 2002)

²¹⁶ (Albers, et al., 2008b)

²¹⁷ (Albers, et al., 2010)

²¹⁸ (Albers, et al., 2003c) (Matthiesen, 2002) (Albers, et al., 2004b)

Frage auf: Wenn mit dem C&C-Ansatz Funktion und Gestalt verbunden werden, wo ist dann in einem C&C-Modell die Funktion und warum wird sie nicht dargestellt?

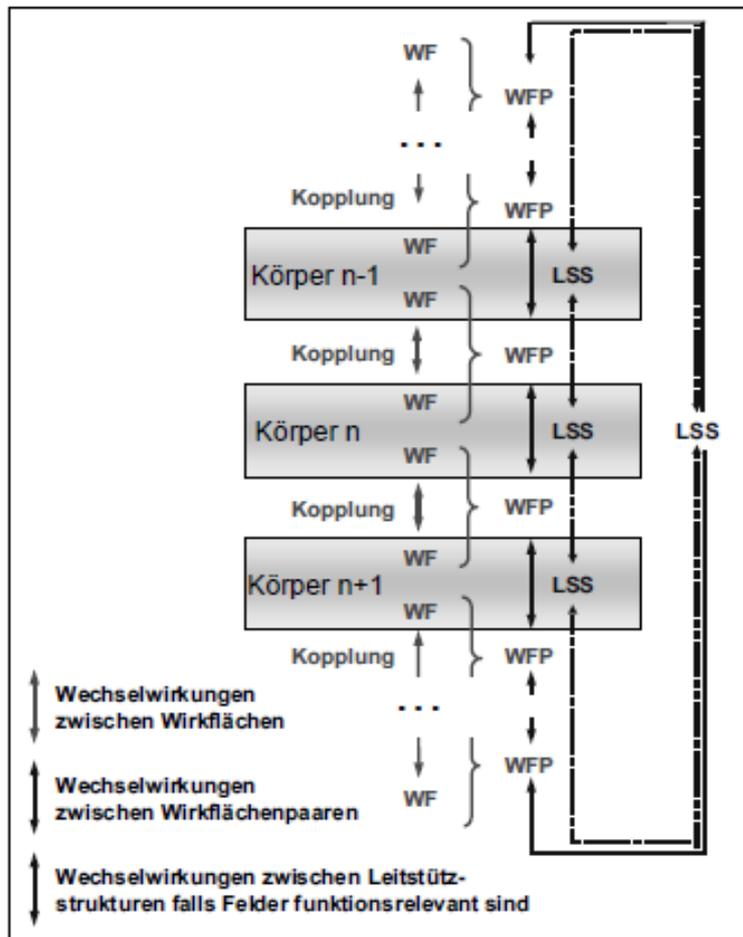


Abbildung 22: C&C-M ohne explizite Funktionsdarstellung²¹⁹

ALBERS und der Autor dieser Arbeit nahmen diese Schwierigkeiten auf und veröffentlichten Arbeiten mit expliziten Funktionsdarstellungen²²⁰. Im Fokus der angesprochenen dieser wissenschaftlichen Arbeiten standen jedoch jeweils andere methodische Aufgabenstellungen zum C&C-Ansatz. Mit der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf die methodische Aufbereitung von Funktion im C&C-Ansatz gelegt und durch Untersuchungen bei einer Vielzahl von Anwendern begründet.

2.5 Fazit zum Stand der Forschung

Die Vielzahl der veröffentlichten Modelle und Modellsysteme zur Beschreibung von Abstraktionen haben Defizite darin, die individuell ablaufenden Prozesse des Lösens von Gestaltungsproblemen zu unterstützen. Durch die Festlegung der

²¹⁹ (Matthiesen, 2002)

²²⁰ (Albers, et al., 2007) (Keller, et al., 2007), (Börsting, et al., 2008), (Albers, et al., 2009b)

Abstraktionsebene in diskretisierten Schritten wird eine eher vorschreibende Vorgehensweise erzwungen. Es sind Beschreibungsformen für die unterschiedlichen Abstraktionsebenen notwendig, die eine vernetzte, aufeinander referenzierende Darstellung der Objekte zwischen Funktion und Gestalt ermöglichen. Zuvor muss geklärt werden, welche Bedeutung von Funktion in welcher Situation zum Tragen kommt oder ob es gegebenenfalls sinnvoll ist, unterschiedliche Bedeutungen von Funktion in einer Situation zu kombinieren. Diese Beschreibungsformen lassen es zu, Informationen unterschiedlicher Abstraktionsstufen darzustellen und somit dem notwendigerweise heuristischen Vorgehen bei der Lösung von Gestaltungsproblemen Rechnung zu tragen. So können die durch die empirische Konstruktionsforschung ermittelten Erkenntnisse direkt im Modell umgesetzt werden.

Der Contact and Channel Ansatz (C&C-Ansatz) ermöglicht die geforderte Art der flexiblen Modellbildung mit unterschiedlichen Abstraktions- und Detaillierungsgraden. Die Analyse der verfügbaren Literatur zeigt, dass es mit dem C&C-Ansatz gelingt Gestaltungsprobleme auch in der industriellen Produktentwicklung zu lösen. Diese industriellen Problemstellungen wurden jedoch stets von den Forschern selbst bearbeitet. Die Frage, die sich hier anschließt, ist: Wie sieht das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz aus, wenn die Anwender keine Methodenexperten sind und die Vorgehensweise für sie neu ist? In neueren Arbeiten zum C&C-Ansatz werden explizit Funktionen beschrieben, jedoch lag der methodische Schwerpunkt der Arbeiten jeweils auf einem andern Themengebiet. In der Literatur wird die Vieldeutigkeit von Funktion beschrieben und es werden Hinweise auf die spärliche Verbreitung von Funktionen im industriellen Umfeld gegeben. Deshalb wird der Fokus der vorliegenden Arbeit auf die Anwendung von Funktionen im C&C-Ansatz beim Lösen von Gestaltungsproblemen gelegt.

Vielen Methoden liegt der Funktionsbegriff der klassischen deutschen Konstruktionsmethodik, die stark von PAHL und BEITZ geprägt ist, zugrunde. In diesem Zusammenhang wird in vielen Arbeiten an rigiden Konventionen der Darstellung und Formulierung von Funktionen festgehalten wird. Diese wurden für einzelne Anwendungsfälle entwickelt und hatten niemals den Anspruch allgemein übertragbar zu sein. Diese Widersprüche wurden von der Forschergruppe um ALBERS in den vergangenen Jahren angegangen und sollen in dieser Arbeit durch eine empirische Untersuchung bei einer Vielzahl von Methodenanwendern aufgearbeitet werden. Um die Formalisierung des C&C-Ansatzes voranzutreiben und damit eine bessere flexible Modellbildung zu erreichen, sollten entsprechende Festlegungen, Definitionen und Handlungsanweisungen in enger Erkenntnislage zu den späteren Anwendern, den Entwicklungsingenieuren in der Industrie vorgenommen werden. Denn ein weiterer verstärkender Faktor der schwachen Akzeptanz von Methoden ist die Trennung von Methodenentwicklung und

Methodentransfer. In diesem Kapitel wurde dargelegt, dass die Entwicklung einer Methode und deren Transfer hin zum Anwenden nicht getrennt verlaufen sollten. Ein enger Kontakt zwischen Entwicklung und potenziellen, späteren Anwendern ist deshalb zwingend notwendig, um akademische Fallen in der Einführung zu vermeiden. An diesem Punkt setzt der im Folgenden beschriebene Handlungsbedarf an und es werden hieraus die Ziele für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

„Funktionen sind ein Albtraum“, erklärt ein renommierter Forscher, nachdem er einige Jahre Untersuchungen auf dem Gebiet betrieb. Die Erforschung von Funktionen in der Produktentwicklung zeigt eine Vielfalt an Definitionen, die Untersuchungen an unterschiedlichen Anwendungen entstammen. In dieser Arbeit wird der Funktionsbegriff für das Lösen von Gestaltungsproblemen angewandt und validiert. Maschinenbauingenieure verwenden Funktionen meist, um zu beschreiben, was der Zweck des zu gestaltenden Systems ist, oder wie sich tatsächlich verhält. Diese Diskrepanz ist Antrieb für die Entwicklung von Produkten.

Der C&C-Ansatz wurde entwickelt, um Funktion und Gestalt eines technischen Systems im Verbund zu beschreiben. Dadurch wird verhindert, dass notwendige, abstrakte Beschreibungen des Produktes im Laufe des Entwicklungsprozesses nicht verloren gehen. In der klassischen Konstruktionsmethodik werden Funktion und Gestalt meistens unabhängig voneinander betrachtet. Mit dem C&C-Ansatz wird ein anderer Weg eingeschlagen. Da Funktion und Gestalt sich einander bedingen werden sie nicht unabhängig voneinander beschrieben.

Die Auswertung der gegenwärtigen Literatur zeigt, dass das Gebiet der Funktionen differenziert zu betrachten ist. Des Weiteren wird den Entwicklungsingenieuren wenig Unterstützung bei der Anwendung unterschiedlicher Bedeutungen von Funktion an die Hand gegeben wird. Dies gilt auch für den C&C-Ansatz.

In der vorliegenden Arbeit soll der dem C&C-Ansatz zugrunde liegende Funktionsbegriff kritisch hinterfragt und für das Lösen von Gestaltungsproblemen differenziert entwickelt werden. In den folgenden Abschnitten wird dieses übergeordnete Ziel erläutert und durch zu beantwortende Forschungsfragen spezifiziert.

3.1 Funktion und Gestalt

Im Stand der Forschung wurde beschrieben, dass es gute Gründe gibt in unterschiedlichen Situationen unterschiedliche Auffassungen²²¹ von Funktion zu verwenden. Nachfolgend werden diese Gründe aufgegriffen, daraus

²²¹ Als Auffassung wird in dieser Arbeit das bezeichnet, was die Probanden und Projektbearbeiter meinen unter Funktion zu verstehen. Wie im Lauf der Arbeit gezeigt wird richtet sich diese Meinung entweder auf die Bedeutung, die Darstellung oder die Formulierung von Funktion

Forschungshypothesen und Forschungsfragen entwickelt, sodass die Situation mit deren Beantwortung verbessert werden kann.

Mit Hilfe von Funktionen werden verschiedene Sichtweisen auf ein technisches System beschrieben. Für das Lösen von Gestaltungsproblemen²²² ist die Bedeutung von Funktionen bisher wenig differenziert betrachtet worden. Funktionen werden verwendet, um einerseits den Zweck, andererseits für das Verständnis der Vorgänge im System zu beschreiben.

„Wie etwas funktioniert ist intuitiv und schwer zu beschreiben“, antwortet ein erfahrener Entwicklungsingenieur²²³, als er nach einer expliziten Funktionsbeschreibung gefragt wird. Mit „intuitiv“ meint er, dass er sich sehr wohl über die Vorgänge im technischen System bewusst ist, dass er auch in der Lage ist, das System weiterzuentwickeln, es für ihn jedoch sehr schwer ist, dieses Verständnis explizit zu beschreiben. Funktionen werden durch Produktentwickler oftmals auf Bauteile oder Baugruppen bezogen, sodass Funktion greifbarer, konkreter wird. Andererseits dient eine abstrakte Funktionsbetrachtung als unvoreingenommene Ausgangslage für die Suche nach Lösungen.

Die Analyse der Fachliteratur und die Auswertung der gewonnenen empirischen Daten führen daher zur Frage, warum Entwicklungsingenieure Schwierigkeiten haben, Funktionen explizit zu verwenden. Für das Lösen von Gestaltungsproblemen ist es jedoch wichtig explizit zu beschreiben, wie ein System funktioniert. Zwei Gründe untermauern diesen Sachverhalt:

- Ingenieure merken erst, dass Sie ein System doch noch nicht vollständig verstanden haben²²⁴, wenn Sie versuchen zu erklären wie es funktioniert. Dieser Grund lässt sich mit mentaler Ökonomie erklären²²⁵. Es werden mentale Modelle der Funktionen erstellt, deren Defizite erst erkannt werden, wenn sie von außen stimuliert werden. Der Zeitpunkt, zu dem ein Ingenieur von sich behauptet, dass die Funktionsweise des Systems verstanden ist oder die Tiefe, mit welcher er meint, das System zu verstehen, ist subjektiv²²⁶. Bleibt dieses Verständnis implizit, besteht wenig Möglichkeit die Lücke aufzudecken, geschweige denn, das Problem zielgerichtet zu lösen.

²²² Charakteristika von Gestaltungsproblemen sind im Abschnitt 2.2, S.14ff beschrieben.

²²³ Aussage aus den Interviews dieser Arbeit zugrunde liegenden Studien, siehe Abschnitt 4.2.2

²²⁴ (Visser, 1996) und Abschnitt 2.2

²²⁵ (Hacker, 1997), (Dörner, 1976), siehe auch Stand der Forschung Abschnitt 2.2, S. 14ff

²²⁶ Hier wird den Ergebnissen der Arbeit vorgegriffen, so dass die Aussage nur für die in dieser Arbeit durchgeführten Studien gelten kann. Genau Beschreibung im Abschnitt, 6.3.4, S. 154ff

- Das Verständnis wird im Team kommunizierbar²²⁷. Somit kann der Entwicklungsprozess auf einem gemeinsamen Verständnis aufbauen. „Das Schlimmste ist, wenn einer im Team denkt, dass er weiß, wie das System funktioniert“, erklärt ein Teamleiter in der Entwicklung im Interview²²⁸ zum Thema Teamarbeit. Das Resultat eines solchen Missverständnisses ist, dass der Entwicklungsprozess in eine falsche Richtung läuft, da diesem durch die falsche Annahme die Grundlage entzogen wird.

Für den Bereich der *Auffassungen von Funktionen* ergibt sich die folgende Forschungshypothese HP1, die durch Beantwortung der nachgestellten Forschungsfragen verifiziert wird:

HP1: Die Verwendung von Funktionen ist für das Lösen von Gestaltungsproblemen von großer Bedeutung, jedoch geschieht dies nur intuitiv.

Forschungsfragen:

- Welche unterschiedlichen Auffassungen von Funktion gibt es und wie stehen diese in Bezug zum Lösen von Gestaltungsproblemen?
- Wie werden Funktionen auf die sie erfüllende Gestalt bezogen?
- Wie werden unterschiedliche Auffassungen von Funktion dargestellt und formuliert?

3.2 Ablauf des Lösen von Gestaltungsproblemen

Das Lösen von Gestaltungsproblemen ist ein heuristischer, komplexer Vorgang, der durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst ist. Somit ist eine Vereinheitlichung der Abläufe auf einer individuellen Ebene nicht möglich. Bisherige Ansätze diskretisieren²²⁹ den Übergang zwischen Funktion und Gestalt, sodass eine Vorgehensweise aufgezwungen wird. Es entsteht eine vorschreibende, unflexible Methode, die von vielen Produktentwicklern abgelehnt wird²³⁰. In Abschnitt 2.2 wurde bereits beschrieben, dass beim Lösen von Gestaltungsproblemen viele Schritte nicht durch algorithmisches Vorgehen bewältigt werden können, sondern ein heuristisches Vorgehen und damit analytische Fähigkeiten und auch Kreativität erfordern.

²²⁷Vgl. (Vermaas, 2010) Hier wird beschrieben, wie ein unterschiedliches Funktionsverständnis zu Kommunikationsproblemen führen kann. Vgl. (Deng, 2002)

²²⁸ Aussage aus den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Interviews, siehe Abschnitt 4.2.2

²²⁹ Abschnitt 2.3.5, Seite 33

²³⁰ Abschnitt 2.3.6, Seite 43

„Um technische Systeme verstehen [Analyse] zu können, um sie zu generieren [Synthese] und zu manipulieren, muss die Vielgestaltigkeit bzw. Komplexität realer technischer Systeme herunter gebrochen werden“²³¹. Der Entwicklungsprozess sollte an dem ausgerichtet werden, was ein System tun sollte²³², jedoch muss die Verwendung von Funktionen in diesem Prozess flexibel genug sein, damit der Entwickler ihre Anwendung nicht aufgibt. Es gilt zu bestimmen, welche Auffassung von Funktion²³³ bei welcher Aktivität²³⁴ angewendet werden kann. Wenn Anwender auf Probleme treffen verlassen sie oft den vorgezeichneten, systematischen Weg, da die neu entstandene Situation eine Anpassung der Vorgehensweise erfordert. Vor allem diese neuen Situationen gilt es flexibel und dennoch methodisch zu unterstützen.

Die zweite Forschungshypothese lautet:

HP2: Beim Lösen von Gestaltungsproblemen müssen unterschiedliche Vorgehensweisen zugelassen werden. Hierbei sind unterschiedliche Bedeutungen von Funktion notwendig.

Forschungsfragen:

- Wann wird welche Auffassung von Funktion benötigt?
- Wie wirken sich unterschiedliche Auffassungen von Funktion auf die Vorgehensweise aus?
- Ab welchem Zeitpunkt kann ein Problem als verstanden gelten, sodass nach Lösungen gesucht werden kann?
- Welche Vorgehensweisen, Funktion und Gestalt zuzuordnen, gibt es?

3.3 Ausrichtung an den Anwendern

Aufbauend auf den Erkenntnissen zu Funktion und Gestalt, sowie zu den Vorgehensweisen beim Lösen von Gestaltungsproblemen, wird der Begriff Funktion für den C&C-Ansatz differenziert entwickelt. Hierbei spielen für die Ausrichtung an den Anwendern zwei Punkte eine wichtige Rolle:

²³¹ (Franke, 1995)

²³² (Albers, et al., 2010)

²³³ Verschiedene Bedeutungen sind im Abschnitt 2.3.1 beschrieben

²³⁴ Aktivität im Sinne von Albers als ein Vorgang, der bei der Produktentstehung durchlaufen werden muss, der jedoch erst innerhalb eines konkreten Projektes eine zeitliche Zuordnung erfährt und somit zur Phase wird, (Albers, 2010).

- Die bestehenden Grundhypothesen²³⁵ weisen in Bezug auf Funktion einen Interpretationsspielraum²³⁶ auf. Daher ist das Erlernen von C&C-M mit einem Zurechtlegen des Ansatzes verbunden, bevor eine nützliche Anwendung auf Gestaltungsprobleme möglich ist.
- Fehler, die bisher bei der Methodeneinführung²³⁷ im Allgemeinen gemacht wurden, sollen in Zukunft vermieden werden. Dies betrifft vor allem die Flexibilität und die Anpassbarkeit²³⁸ des C&C-Ansatzes an spezifische Problemstellungen.

Dies führt zur folgenden Forschungshypothese und angeschlossenen Forschungsfragen:

HP 3: Die aktuellen Grundhypothesen des C&C-Ansatzes sind in Bezug auf die Funktion zu allgemein formuliert.

Der C&C-Ansatz wurde und wird entwickelt, um eine flexible und funktionsorientierte Modellbildung zu ermöglichen. Die Analyse der veröffentlichten Arbeiten zeigt jedoch, dass bei der Beschreibung der Funktion in C&C-M eine allgemeine, viele Bedeutungen abdeckende Auffassung von Funktion gewählt²³⁹ wurde, die vielen Anwendungsgebieten gerecht wird. Anwendungsgebiet dieser Arbeit ist das Lösen von Gestaltungsproblemen. Hierfür gilt es die bestehende Auffassung von Funktion differenziert zu entwickeln, um den beschriebenen²⁴⁰ Bedingungen beim Lösen von Gestaltungsproblemen Rechnung zu tragen. Daraus ergeben sich für die differenzierte Betrachtung von Funktionen in C&C-M folgende Forschungsfragen:

- Wie wird Funktion im C&C-Ansatz dargestellt und welche Auffassungen liegen dem jeweils zugrunde?
- Was sind die Elemente eines C&C-Modells eines technischen Systems und wie werden diese in verschiedenen Situation dargestellt?
- Wie werden die Grundhypothesen des C&C-Ansatzes verstanden und welche Konsequenzen hat dies für den Aufbau eines spezifischen C&C-Modells?
- Wie wird C&C-M in Analyse und Synthese beim Lösen von Gestaltungsproblemen eingesetzt?

²³⁵ Sowohl die Grundhypothesen nach MATTHIESEN (Matthiesen, 2002) als auch die neuen Grundhypothesen nach ALBERS (Albers, et al., 2008b) und (Albers, 2010) differenzieren nicht zwischen verschiedenen Bedeutungen von Funktion

²³⁶ Abschnitt 2.4.4, S. 56

²³⁷ Die Fehler werden in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, (Geis, et al., 2008)

²³⁸ Abschnitt 2.1.3, Seite 13

²³⁹ Die Auffassung im Sinne der VDI-Richtlinie 2221, modifiziert durch ALBERS, Abschnitt 2.4.4.

²⁴⁰ Siehe Abschnitt 2.2, S.14ff

HP 4: Bei der Anwendung treten C&C-Ansatz unspezifische Barrieren auf

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Erlernen des C&C-Ansatzes durch Studierende und Ingenieure in der Industrie zu vereinfachen. Hieraus ergeben sich neue Anforderungen an die Methode, die bei deren Weiterentwicklung zu berücksichtigen sind. Im Abschnitt „Stand der Forschung“ (2.1.3), werden Gründe für ein Scheitern vieler Methoden beim Transfer in die Praxis genannt. Es werden auch Vorschläge gegeben, wie die Anpassung und Weiterentwicklung der Methoden in enger Orientierung an den Anwender ablaufen sollte. Die Weiterentwicklung des C&C-Ansatzes wird deshalb auf Basis empirischer Studien durchgeführt, sodass die Anpassung der Methode für Aufgaben im Unternehmen und damit die Erhaltung der Flexibilität gegeben ist.

Forschungsfragen:

- Was sind unspezifische Gründe für die Schwierigkeiten bei der Anwendung des C&C-Ansatzes?
- Welche Vorprägungen stützen oder blockieren die Anwendung des C&C-Ansatzes?
- Welchen Bedarf und welche Art der Anleitung gibt es und wie erfolgreich sind diese jeweils?
- Wo konkurriert der C&C-Ansatz mit anderen Methoden?

Im Vordergrund der Weiterentwicklung des C&C-Ansatzes steht hierbei nicht dem Anwender normativ-dogmatisch vorzuschreiben, wie er vorgehen soll. Vielmehr wird durch die Schaffung eines Prozessverständnisses und durch die gezielt angepasste Modellbildung ein besseres Verständnis für den Prozess gefördert.

4 Forschungsmethode für empirische Studien

Dieses Kapitel beschreibt die vom Autor gewählten Methoden zur Gewinnung und Auswertung der Daten. Zunächst wird begründet, warum eine empirische Vorgehensweise notwendig ist. Anschließend wird aufgezeigt, dass es bei der empirischen Erforschung qualitative und quantitative Methoden gibt. Für die vorliegende Arbeit wurde eine vorrangig qualitative Methode gewählt, da statistisch signifikante Studien zum einen zu aufwendig, zum anderen a priori eine genaue Kenntnis des zu erforschenden Gegenstandes erfordern.

4.1 Empirische Vorgehensweise

VERMAAS²⁴¹ arbeitet sorgfältig und schlüssig die wissenschaftlichen Ansätze und Modelle für Funktionen und Funktionsmodellierung heraus und vergleicht diese. In den von VERMAAS aufgezeigten Arbeiten wird jedoch in den meisten Fällen die Anwendung der Forscher selbst evaluiert. Untersuchungen über die Verwendung von Funktionen bei einer Vielzahl von Personen, für die Funktionen Mittel zum Lösen von Gestaltungsproblemen sind, werden nicht aufgezeigt und konnten vom Autor dieser Arbeit nicht aufgefunden werden.

In ähnlicher Weise hat eine Validierung der praktischen Anwendung des im Vergleich zum Konzept von Funktionen jungen C&C-Ansatz bisher nicht stattgefunden²⁴². Die genannten Forschungsfragen²⁴³ beziehen sich zum größten Teil auf Aspekte, die mit der Anwendung des C&C-Ansatzes in realen Projekten zum Lösen von Gestaltungsproblemen in enger Verbindung stehen. Diese Fragen auf Basis der bestehenden Literatur zu beantworten, ist nicht umsetzbar und erfordert deshalb eine **empirische Forschungsmethode**.

Für empirische Forschungsmethoden sind jedoch gewisse Randbedingungen zu beachten, da Verhaltens- und Denkweisen von Menschen bewertet werden.

Für die Analyse empirischer Forschung in der Produktentwicklung folgert JÄNSCH²⁴⁴, „dass die Erforschung des Sachverhaltes über das Konstruktionsobjekt ein Umweg sei. Die Analyse der Arbeitsweise ist ein psychologisches Problem, kein naturwissenschaftliches. Eine unabhängige Erforschung vom Konstruktionsobjekt ist

²⁴¹ (Vermaas, 2010)

²⁴²Die von ALBERS UND MATTHIESEN durchgeführte Evaluation des C&C-Ansatzes wurde mit Studierenden im 2ten Fachsemester durchgeführt, (Albers, et al., 2003b)

²⁴³ Siehe Abschnitt 3

²⁴⁴ (Jänsch, 2007)

jedoch genauso wenig erreichbar“. Aus diesem Grund fordert JÄNSCH, dass die „psychologischen Untersuchungsmethoden wichtigstes Untersuchungsinstrument der Konstruktionsforschung“ werden sollen. Darüber hinaus gilt es sicherlich auch, soziologische und ethnologische Untersuchungsmethoden zu berücksichtigen. Die empirische Erforschung der Produktentwicklung wird aufgrund der Vielzahl und Komplexität der beeinflussenden Faktoren jedoch einen eher qualitativen Charakter aufweisen. Wie auch in dieser Arbeit sind zu Beginn einer Forschungsarbeit die Probleme noch gar nicht bekannt, sodass zunächst Untersuchungen angestellt werden müssen, um das Forschungsfeld zu strukturieren.

„Vertreter der qualitativen Forschungstradition machen geltend, dass ein Verzicht der Sozialwissenschaften auf qualitative Methoden dazu führen würde, dass wesentliche soziale Phänomene nicht mehr untersucht werden könnten, weil sie nicht durch standardisierte Methoden wie Fragebögen oder die Analyse demografischer Daten erfasst werden könnten“²⁴⁵.

BORTZ²⁴⁶ „führt die Schwierigkeiten kreative Untersuchungsideen zu finden, zu einem großen Teil auf die Art der Ausbildung in den Sozialwissenschaften zurück. Er schätzt, dass 90% des Unterrichts über Forschungsmethodik auf die Vermittlung präziser Techniken zur Überprüfung von Hypothesen entfallen und dass für die Erarbeitung von Strategien, schöpferische Forschungsideen zu finden, überhaupt keine oder nur sehr wenig Zeit aufgewendet wird, obwohl dieser Teil wissenschaftlicher Methodik eigentlich der wichtigere sei.“

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien der Anwendung des C&C-Ansatzes mit Fokussierung auf die Bedeutung von Funktion wurden in zwei unterschiedlichen Bereichen durchgeführt. Zum einen wurden Studien unter Realbedingungen²⁴⁷ in Unternehmen oder vergleichbarem Umfeld durchgeführt und

²⁴⁵ (Cicourel, 1974), die Kritiker meinen: „die Verwendung quantitativer Methoden für die meisten sozialwissenschaftlichen Gegenstandsbereiche ist angemessener. Sie werfen qualitativen Sozialforschern manchmal Unwissenschaftlichkeit vor und betonen zwei Punkte: zum einen kritisieren sie die Subjektivität und Willkürlichkeit der erhobenen Daten (die ja nicht mit einem einheitlichen standardisierten Schema erhoben werden) und der darauf aufbauenden Analyseergebnisse und Interpretationen. Zum anderen wird kritisiert, dass qualitative Sozialforschung (wegen des großen Aufwands, den bspw. die Durchführung qualitativer Interviews und deren interpretativer Analyse bedeutet) nur mit sehr kleinen Fallzahlen arbeite und deshalb keine repräsentativen Ergebnisse erbringen könne. Insgesamt würden die Gütekriterien und Qualitätsstandards empirischer Sozialforschung wie Objektivität, Reliabilität und Validität nicht erfüllt.“

²⁴⁶ (Bortz, et al., 2002)

²⁴⁷ Das Layout, die Auswertung und die Ergebnisse dieser Studien sind in Kapitel 5, S.76ff ausführlich beschrieben.

ausgewertet. Zum anderen wurde eine Studie unter Laborbedingungen²⁴⁸ mit konstanten Randbedingungen und 20 voneinander isolierten Teilnehmern durchgeführt.

4.2 Methodenchronologie der vorliegenden Arbeit

Übergeordnetes Ziel der Arbeit war den C&C-Ansatz durch Anwendung beim Lösen von realen Gestaltungsproblemen weiterzuentwickeln. Dieses übergeordnete Ziel der Arbeit²⁴⁹ erforderte zunächst Handlungsfelder zu identifizieren und das Forschungsfeld zu strukturieren, sodass für eine Arbeit, wie die vorliegende, eine Fokussierung auf eines dieser Handlungsfelder vorgenommen werden konnte. Um diese Handlungsfelder zu bestimmen, wurden vom Autor dieser Arbeit zunächst Arbeiten in vier²⁵⁰ unterschiedlichen Formaten durchgeführt. Abbildung 23 zeigt die Methodenchronologie. Er leitete Studierende und berufserfahrene Ingenieure an, den C&C-Ansatz²⁵¹ zum Lösen von Gestaltungsproblemen anzuwenden und bearbeitete selbst Projekte, in denen jeweils Gestaltungsprobleme zu lösen waren. Die währenddessen begleitende qualitative Auswertung wurde in 4 Forschungsworkshops²⁵² vertieft diskutiert und bearbeitet.

Die während dieser Zeit entstandenen Veröffentlichungen²⁵³ von ALBERS und dem Autor der vorliegenden Arbeit dokumentieren die Ergebnisse. Auch in Zusammenarbeit mit ECKERT sind in dieser Zeit von Januar 2006 bis Ende 2008 zwei Arbeiten veröffentlicht, die die Zusammenarbeit mit dem Department of Design der Open University und dem Engineering Design Centre der Cambridge University in England dokumentieren. In 2009 wurde in Vorbereitung auf den Aufenthalt von Frau DR. ECKERT am IPEK ein Programm erstellt, das die Fokussierung auf das Thema Funktionen im C&C-Ansatz bewirkte. In Zusammenarbeit mit Frau DR. ECKERT wurden im Mai 2009 und im Juni 2009 11 Interviews mit Entwicklungsingenieuren in der Industrie durchgeführt. Diese Entwicklungsingenieure kannten den C&C-Ansatz aus den zuvor durchgeführten Projekten²⁵⁴. Mit der Durchführung dieser Interviews verstärkte sich die Fokussierung auf das Thema Funktionen im C&C-Ansatz.

²⁴⁸ Das Layout, die Auswertung und die Ergebnisse dieser Studien sind in Kapitel 6, S.117ff ausführlich beschrieben.

²⁴⁹ Siehe Abschnitt 1.3

²⁵⁰ Diese vier Formate werden in diesem Kapitel kurz aufgegriffen. Die detaillierte Beschreibung findet in Kapitel 5 statt.

²⁵¹ Das Vorgehen hierzu ist in Abschnitt 2.4.3 beschrieben

²⁵² Diese sind ebenfalls in Kapitel 5 beschrieben.

²⁵³ (Albers, et al., 2007) (Albers, et al., 2007c) (Albers, et al., 2008) (Albers, et al., 2008b) (Albers, et al., 2008c) (Börsting, et al., 2008) (Marques, et al., 2009) (Albers, et al., 2009b)

²⁵⁴ Als Projekte werden in dieser Arbeit die Diplomarbeiten, Schulungen, Entwicklungsprojekte und Forschungsworkshop bezeichnet, die die Datenbasis für diese Arbeit bilden

Deshalb wurde im Juli und August 2009 in enger Zusammenarbeit mit Frau DR. ECKERT das Experiment zu Funktionen mit 20 Mitarbeitern des IPEK durchgeführt. Die Auswertung der Interviews ist nachfolgend beschrieben und begründet die Fokussierung auf das Thema Funktionen im C&C-Ansatz.

4.2.1 Wichtigkeit von Funktionen aus Sicht der Methodenanwender

Die Analyse der Interviews zur Evaluation der Schulungen²⁵⁵ zeigt, dass die Entwicklungsingenieure eine sehr heterogene Auffassung von Funktion haben. Allerdings stellt sich in dieser heterogenen Auffassung heraus, dass Funktion von jedem Einzelnen als wichtiges Mittel in der täglichen Arbeit als Entwicklungsingenieur angesehen wird. Die nachfolgenden Auszüge aus den Interviews verdeutlichen dieses Ergebnis. Beispielsweise äußerte sich ein befragter Entwicklungsingenieur folgendermaßen: *„Es ist das: jeder weiß Funktionen sind wichtig, Funktionszusammenhänge sind wichtig...“* oder ein weiterer Proband: *„das ist ein grundlegender Bestandteil der Konstruktionsmethodik, dass du dich mit Funktionen beschäftigst...“*.

Die Entwicklungsingenieure sehen durchweg Funktion als Spezifikation für die Gestaltung oder das Funktionsverständnis als Weg zu neuen Lösungen an. Funktion sei etwas, das dem Entwicklungsprozess eine Struktur geben kann. Funktionen sind auch wichtig, um Gefahren- und Potenzialerkennung²⁵⁶ durchführen zu können. Dies ist mit dem Verstehen des Systems verbunden.

Zur Auffassung von Funktion werden Antworten in zwei Bereichen gegeben. Erstens: Funktionen beschreiben einen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße eines technischen Systems und zweitens wird Funktion oft im Zusammenhang mit dem Zweck oder der Anforderung an ein System definiert. Analysiert man jedoch die einzelnen Interviews, so zeigt sich, dass die Definition innerhalb dieser Bereiche sehr heterogen ist. Als Beispiel sei hierfür folgende Aussage aufgeführt: *„Einmal kann man im mathematischen Sinne Funktionen als festen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße verstehen, das hat auch was mit dem Funktionieren zu tun. Das Wort funktionieren, also etwas funktioniert so oder so. Das ist eine Richtung und vielfach wird Funktion in einer Weise verwendet, die ich jetzt eher als Nutzen bezeichnen würde, wo eine Relation zwischen dem technischen Objekt und irgendwelchen Personen hergestellt wird“*.

²⁵⁵ Detailliert beschrieben in Abschnitt 5.1.3, Seite 81.

²⁵⁶ Beispielsweise eine FMEA – Failure Mode and Effects Analysis, die im Unternehmen als Prozess festgeschrieben ist.

Der von VERMAAS, BROWN UND BLESSING, ROPOHL²⁵⁷ und anderen beschriebene Dualismus einer inneren und einer äußeren Sicht auf das System, zeigt sich also auch in der Praxis. Keiner der Interviewpartner wollte auf Nachfrage ein Funktionsmodell eines Systems zeigen. Diese seien zu unvollständig oder nur „implizit vorhanden“.

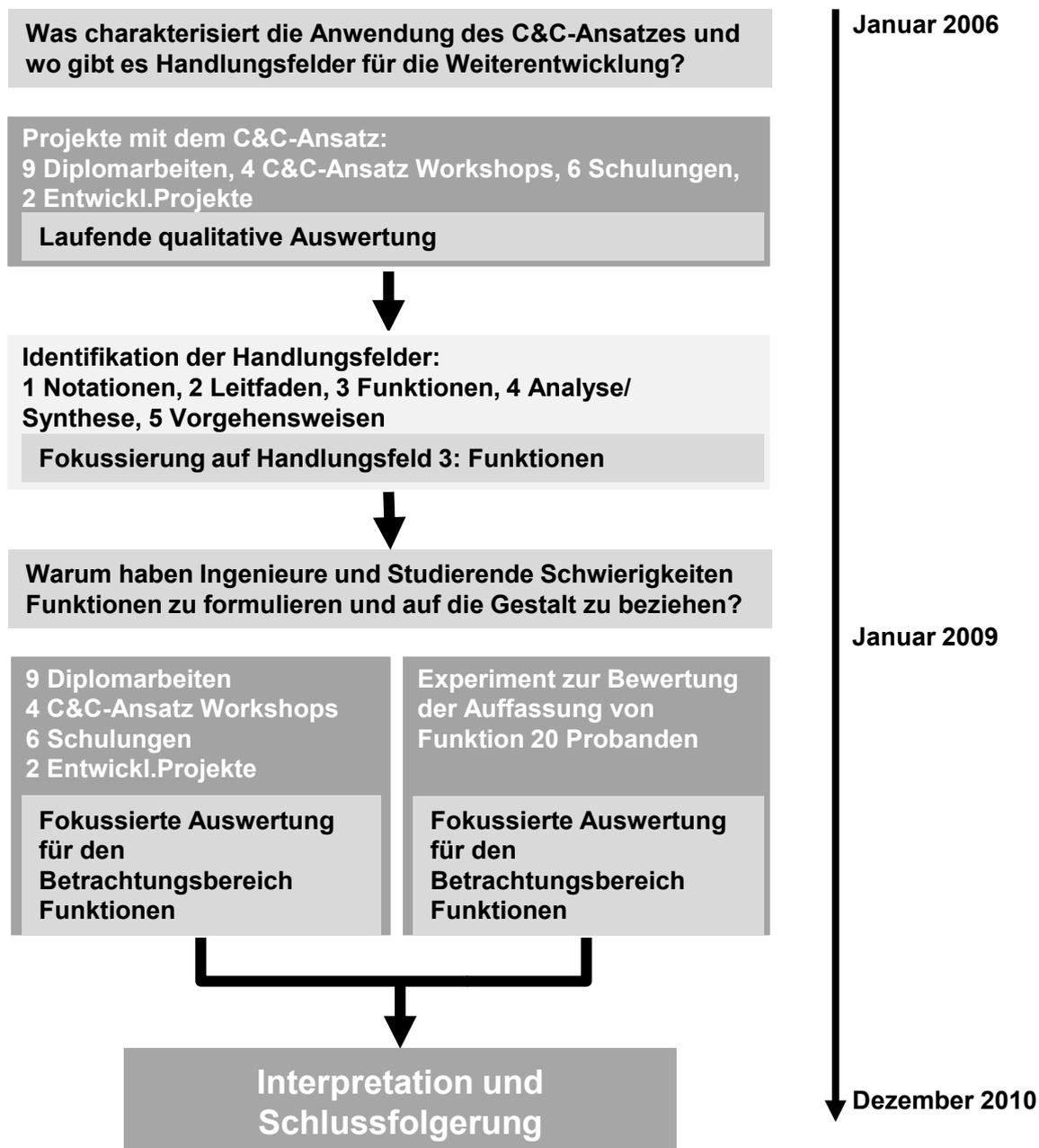


Abbildung 23: Methodenchronologie dieser Arbeit

²⁵⁷ Siehe Abschnitt 2.3.5, Seite 33

Die Fokussierung auf das Thema Funktionen deutete sich bereits im Mai 2008 durch die Forschungsworkshops²⁵⁸ an. Die Themen der Workshops stellten zunehmend *Funktionen im C&C-Ansatz* in den Mittelpunkt.

4.2.2 Fokussierung auf Funktionen in C&C-Ansatz

Von September 2009 bis März 2010 wurde das Experiment von Frau DR. ECKERT, dem Autor dieser Arbeit und der Diplomandin Anne Ruckpaul ausgewertet und in bisher zwei Veröffentlichungen²⁵⁹ dokumentiert. Parallel zur Auswertung des Experimentes wertete der Autor dieser Arbeit ein zweites Mal die Diplomarbeiten, Entwicklungsprojekte, Schulung und der Forschungsworkshops aus. Der Fokus wurde jedoch auf Funktionen gesetzt. Die Auswertung wurde nach einem dem Experiment ähnlichen Schema durchgeführt. Abbildung 23 verdeutlicht diesen Ablauf. So konnten sowohl aus Projekten als auch Experiment Schlussfolgerungen gezogen werden, die zu einer Verbesserung der Situation führen können.

4.2.3 Studien unter Realbedingungen

Die Erforschung von Vorgehensweisen kann unter Realbedingungen nicht gleichermaßen fokussiert ablaufen, wie unter Laborbedingungen. Der Forscher kann nicht vollständig in das Unternehmen eingebunden werden²⁶⁰. Erstens ist der Forscher als partizipierender Beobachter eingebunden und hat somit immer eine Distanz zum ausführenden Personal. Zweitens werden im Unternehmen oft mehrere parallel und über größere Zeitdauer ablaufende Projekte bearbeitet, die nicht immer vollständig vom Forscher eingesehen werden können. Die Produktentwicklung ist ein multidimensionales Problem, deren Studie einen Multi-Methodenansatz der Beschreibung und Interpretation erfordert²⁶¹. Die kritische Evaluation der Vorgehensweisen wird durch das „Hineindenken“ in die verschiedenen technischen Sachverhalte und Beteiligung an der Lösungsfindung verstärkt. Bereits in anderen Arbeiten wie z. B. von BLESSING²⁶² wurde erkannt, dass bei der Erforschung von Vorgehensweisen im realen industriellen Umfeld mehr Beteiligung der Forscher in den Projekten selbst notwendig ist, um aus der Untersuchung die richtigen Schlüsse zu ziehen. So wurden für die vorliegende Arbeit Projekte in vier unterschiedlichen Formaten durchgeführt. Auf diese Weise konnte der Sachverhalt aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden.

²⁵⁸ Diese sind in Abschnitt 5.1.5, S 84f detailliert beschrieben, da sie für die zweite fokussierte Auswertung als Projekt aufgefasst werden.

²⁵⁹ (Alink, et al., 2010), (Eckert, et al., 2010)

²⁶⁰ (Blessing, 1994)

²⁶¹ (Hale, 1987)

²⁶² (Blessing, 1994)

4.2.4 Experiment unter Laborbedingungen

Die Beobachtung von Vorgehensweisen bei der Produktentwicklung unter Laborbedingungen²⁶³, wie zum Beispiel von BENDER²⁶⁴ beschrieben, können nur teilweise die Wirklichkeit widerspiegeln. So gehören Zeit- und Kostendruck, soziales Verhalten im Team usw. im Labor nicht zu den Randbedingungen der Methode. Dadurch kann deren nicht unerheblicher Einfluss auf das Projekt nicht mit berücksichtigt werden²⁶⁵, wenn die Untersuchung nicht sehr gezielt aufgebaut wird. Untersuchungen unter Laborbedingungen sind sehr sinnvoll, um einen Sachverhalt zu untersuchen, der zuvor identifiziert wurde. So konnte der Fokus der vorliegenden Arbeit durch die erste, begleitende Auswertung der Projekte, die durch Interviews mit den Schulungsteilnehmern und C&C-Ansatz Anwendern abgeschlossen wurde, auf das Thema Funktionen gelegt werden. Mit dem Experiment sollten gezielt vergleichende Untersuchungen unter konstanten Randbedingungen durchgeführt werden, da die Randbedingungen der Projekte stets unterschiedlich waren. Die Diplomarbeiten wurden in unterschiedlichen Unternehmen, Schulungen mit unterschiedlichen Personengruppen, Entwicklungsprojekte mit unterschiedlichen Kollegen und Auftraggebern durchgeführt.

4.3 Datenaufbereitung und Aufwand

Die vorliegende Arbeit war mit erheblichem Aufwand bei der Aufbereitung und Auswertung der entstandenen Daten verbunden. Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über Art und Umfang der entstandenen Daten und den Aufwand zu deren Auswertung.

Format	Anzahl	Zeitdauer	Art und Menge der auszuwertenden Daten	Aufwand der Aufbereitung und Auswertung
Diplomarbeiten	9	6 Monate	Jeweils ca. 100 Seiten Dokumentation, ca. 3 Powerpoint Präsentationen mit 20 Folien, Transkription von 6 1-stündigen Interviews der Betreuer im Unternehmen, eigene Notizen	Eigene Bearbeitung

²⁶³ In der Regel kurze Zeitspannen, akademische Aufgabestellung, Isolation der Probanden

²⁶⁴ (Bender, 2004). Dort werden beispielsweise Studierende unter Laborbedingungen beobachtet und eine Vielzahl von Faktoren mit großem Aufwand bewertet.

²⁶⁵ (Bender, 2004), (Hale, 1987)

Entwicklungsprojekte	2	3 - 6 Monate	Jeweils ca. 100 Seiten Projektdokumentation, Zugriff auf alle Daten im Projekt, eigene Notizen	Mitarbeiter IPEK, eigene Bearbeitung
Schulung	6	1 - 2 Tage	Bildmaterial der Gruppenarbeiten, Evaluation- und Feedbackprotokoll, Transkriptionen von 5 1-stündigen Interviews von Schulungsteilnehmern, eigene Notizen	Eigene Bearbeitung, Mitarbeiter IPEK Jeweils ca. 5 Stunden Transkriptionsarbeit durch wiss. Hilfskräfte
Forschungsworkshops	4	1 Tag	Jeweils 15 Seiten Protokoll, Bildmaterial der Gruppenarbeiten, eigene Notizen	Eigene Bearbeitung
Experiment	20	1 Stunde	Jeweils ca. 4000 Worte (ca. 15 Seiten) Transkription und 1 Din A3 Blatt Zeichnungen und Notizen	Jeweils ca. 5 Stunden Transkriptionsarbeit durch wiss. Hilfskräfte, Diplomarbeit (6 Monate Vollzeit), eigene Bearbeitung, Dr. Eckert

Tabelle 1: Datenmenge der Anwendungen des C&C-Ansatzes

Alleine die Transkription der Interviews und Experimente beanspruchte wissenschaftliche Hilfskräfte mit ca. 5 Stunden pro aufgezeichnete Stunde. Bei der Auswertung der Daten musste immer wieder zwischen Nutzen und Aufwand abgewogen werden.

Beispielsweise wurde das Experiment durch die Diplomandin ANNE RUCKPAUL, Frau DR. ECKERT und den Autor in zwei Stufen ausgewertet. Die erste Stufe diente der Strukturierung der Themenfelder und lieferte entscheidende Hinweise für Schlussfolgerungen. Jedoch wurde auch deutlich, dass erst eine detailliertere Betrachtung ausreichen würde, um weitere ergänzende Schlussfolgerungen zu ziehen. Diese detaillierte Auswertung wurde dann jedoch nur noch bei 8 der 20 Probanden durchgeführt, da nicht genügend Ressourcen für die Auswertung zur Verfügung standen. Dies gilt in gleichem Maße für die zweite fokussierte Auswertung der Projekte.

5 Verwendung von Funktionen in Projekten

Zunächst werden in diesem Kapitel die Projekte beschrieben und deren Auswertung erklärt. Anschließend sind die Ergebnisse entsprechend der Forschungsfragen in vier Unterkapitel aufgeteilt. Zunächst werden die unterschiedlichen Auffassungen von Funktionen aufgezeigt. Danach wird der Einfluss der Vorgehensweise auf die unterschiedlichen Auffassungen von Funktion beschrieben, bevor die Zuordnung von Funktion und Gestalt mit dem C&C-Ansatz näher beleuchtet wird. Abgeschlossen wird das Kapitel mit C&C-Ansatz unspezifischen Barrieren.

Die Abschnitte des Kapitels sind auf der dritten Ebene gemäß der gewonnenen Erkenntnisse unterteilt. Diese Erkenntnisse werden jeweils durch ein oder zwei Beispiele aus den Projekten erläutert. In diesem Kapitel werden nur Beobachtungen dargestellt. Schlussfolgerungen und Handlungsanweisungen werden in Kapitel 7 abgeleitet, da diese durch die Auswertung des Experiments aus Kapitel 6 untermauert werden.

5.1 Auswertungsschema und Beschreibung der Projekte

Das Vorgehen²⁶⁶ zum Lösen von Gestaltungsproblemen wurde in vier unterschiedlichen Formaten angewandt und auf die jeweiligen Randbedingungen angepasst. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die unterschiedlichen Formate der Projekte. Der Autor dieser Arbeit war in alle Projekte eingebunden und hat auf die Vorgehensweise Einfluss genommen. In Tabelle 2 sind dem jeweiligen Format die primären Ziele der Projekte zugeordnet, die beschreiben, ob im Projekt das Gestaltungsproblem oder die Methode im Vordergrund stand. Des Weiteren sind die beteiligten Personen sowie die Rolle des Autors im jeweiligen Projekt aufgelistet.

In den folgenden Abschnitten ist zunächst das Auswertungsschema für die Projekte aufgezeigt, worauf anschließend die vier Formate der Projekte selbst beschrieben werden. Die Absätze enden jeweils mit einer Beschreibung der erzeugten Daten und der Auswertung der Daten.

²⁶⁶ Dieses Vorgehen ist in Abschnitt 2.4.3 beschrieben.

Format	Primäres Ziel des Projektes	Art und Relevanz der Problemstellung	Beteiligte Personen	Rolle des Autors der Arbeit
1. Diplom- arbeiten	Neue Lösungen generieren	Reale Problemstellung im Industrie- unternehmen Lösung innerhalb der Arbeiten ist Pflicht	Jeweils 1 Diplomand, Jeweils 1 Vorgesetzter aus dem Unternehmen (fachliche Kontrolle)	Betreuer der Diplomarbeit Methodische Zielsetzung und Kontrolle der Arbeit
2. Entwicklungs- projekt	Neue Lösungen generieren	Reale Problemstellung beauftragt durch Industrie- unternehmen Lösung innerhalb der Arbeiten ist Pflicht	3 Mitarbeiter des IPEK, Studentische Hilfskräfte	Aktive Bearbeitung der Aufgabenstellung
3. Schulung	Lerneffekt bei den Schulungs- teilnehmern	Reale Problemstellung jedoch ohne Relevanz der Lösungen	Zwischen 7 und 42 Schulungsteilnehme r	Hauptverantwortli che Planung, Durchführung und Nach- bereitung
4. Forschungs- workshops	Diskussion und Bearbeitung von Forschungs- themen zum C&C-Ansatz	Fiktive, akademische Aufgaben- stellungen	Zwischen 15 und 20 Mitarbeiter des IPEK und Industrie	Hauptverantwortli che Planung, Durchführung und Nach- bereitung

Tabelle 2: Vier unterschiedliche Formate von Projekten

5.1.1 Datengrundlage und Vorgehen bei der Auswertung

Die Projekte wurden mittels einfacher Protokollanalyse²⁶⁷ ausgewertet, um vergleichbare Aussagen aus den unterschiedlichen Projekten zu erhalten. Die Protokollanalyse eignet sich zur qualitativen Auswertung unterschiedlicher

²⁶⁷ (Ericson, et al., 1993)

Datensätze. Dies wurde für die Datensätze der Projekte durchgeführt, indem zunächst in 4 ersten Datensätzen sinnvolle Themengebiete identifiziert wurden. Diese Themengebiete wurden den durch die Forschungshypothesen und Forschungsfragen vorbestimmten Feldern zugeordnet. Danach wurden unter Berücksichtigung des so entstandenen und in Tabelle 3 gezeigten Codierungsschemas alle Datensätze untersucht.

Codierungsschema für die Auswertung der Projekte
Auffassungen von Funktionen
Unterschiedlich abstrakte Formulierung von Funktionen
Unterschiedliche Bedeutung von Funktionen
Unterschiedliche Darstellung von Funktionen
Funktionslogische Fehler
Vorgehensweise beim Lösen des Gestaltungsproblems
Funktionen in unterschiedlichen Aktivitäten
Übersicht behalten und gezielt vertiefen.
Zeitpunkt des Beginns der Lösungssuche, Größe des Lösungsraumes
Wann ist das Problem eingegrenzt und wann das System verstanden?
Fixierung auf Methode
Funktion und Gestalt mit dem C&C-Ansatz zuordnen.
Vernachlässigung der LSS
Ein WFP und DAS zweite WFP
Wirkprinzipien und WFP und LSS
Unterschiede in der Anwendung
C&C-Ansatz unspezifische Anwendungsbarrieren

Tabelle 3: Codierungsschema der Anwendungen

Das Auswertungsschema wurde auf die schriftlichen Dokumentationen, Projektberichte, Vorträge, Notizen, Fotos, Ergebnisse von Workshops und eigene Notizen gleichermaßen angewandt. Die Ergebnisse sind in den Abschnitten 5.2 bis 5.5 dargestellt.

5.1.2 Diplomarbeiten in Kooperation mit Industrieunternehmen

Im Zeitraum von vier Jahren wurden neun Diplomarbeiten in Kooperation mit unterschiedlichen Industrieunternehmen verfasst. Die Dauer der Arbeiten war auf sechs Monate begrenzt. Die Aufgabenstellung hatte in keinem Falle einen rein didaktischen, akademischen Hintergrund. Die Studierenden waren für die Zeitdauer

des Projektes im Unternehmen angestellt, sodass neben der durch die Universität vergebenen Benotung, ein Arbeitnehmerverhältnis bestand.

Nr.	Beginn	Thema der Arbeit	Note
DA1	Mai 2007	Systematischer Wissenserwerb zum Einschraubverhalten von Trockenbauschrauben durch Tests und Versuche im realen Einsatzumfeld der Schrauben und der dazugehörigen Geräte. Spezifischer Fokus auf die Funktionen des Bit zur Fixierung der Schraube.	1,3
DA2	Mai 2006	Systematischer Wissenserwerb zum Einschraubverhalten von Trockenbauschrauben durch Tests und Versuche im realen Einsatzumfeld der Schrauben und der dazugehörigen Geräte. Spezifischer Fokus auf die Funktionen der Schraube zur Durchdringung der zu verschraubenden Gips- und Stahlplatten	1,0
DA3	September 2008	Optimierung der Bogenvereinzelnung bei großen Bogenoffsetdruckmaschinen mit dem Ziel der Erhöhung der Druckgeschwindigkeit	1,0
DA4	August 2007	Seitliche Ausrichtung der Papierbögen in Bogenoffsetdruckmaschinen mit dem Ziel der Erhöhung der Druckgeschwindigkeit.	1,3
DA5	Oktober 2007	Konzeption einer Wascheinrichtung für das Lackierwerk einer Bogenoffsetdruckmaschine und Konstruktion eines Prototyps.	1,3
DA6	März 2006	Optimierung der Innenraumentlüftung bei Transportern mit dem Ziel eines verbesserten Türschließverhaltens.	2,0
DA7	September 2009	Entwicklung eines Kettenbremssystems für elektrische Kettensägen mit dem Ziel das Verletzungsrisiko im Falle eines „Kickbacks“ zu minimieren	1,0
DA8	September 2008	Entwicklung eines belastbaren Produktkonzeptes für das schnelle, flexible und zuverlässige Setzen von Trockenbauschrauben als Grundlage für eine Serienentwicklung	1,0
DA9	November 2007	Entwicklung einer alternativen Beschichtung für das Piezoaktormodul eines Dieselinjektors mit dem Ziel die Schädigung des Piezoaktors durch Dieselmotorkraftstoff zu vermeiden.	1,0

Tabelle 4: Aufgabenstellungen der Diplomarbeiten

Zu Beginn der Arbeiten wurden die Studierenden dazu aufgefordert, den C&C-Ansatz und die damit verbundene Vorgehensweise²⁶⁸ zu erlernen. Hierzu wurden am IPEK mehrere Übungen durchgeführt. Dies beinhaltete, dass sich die Studierenden innerhalb einer bestimmten Zeit die Vorgehensweise selbst erarbeiteten und die Ergebnisse danach mit dem Autor dieser Arbeit besprachen und evaluierten. Diese Übungen wurden zu Beginn der Diplomarbeiten intensiv durchgeführt und mit dem Fortgang des Projektes zunächst in wöchentlichen, danach in zwei-wöchentlichen Sitzungen weitergeführt. Nach den ersten intensiven Übungen zum Vorgehen bearbeiteten die Studierenden die Problemstellungen im Unternehmen und übertrugen so die Vorgehensweise auf das reale Gestaltungsproblem. In wöchentlichen 1- bis 2-stündigen Sitzungen wurden die Entwicklungsergebnisse aber vor allem auch die Anwendung des C&C-Ansatzes vorgestellt, evaluiert, weiterentwickelt und der weitere Fortgang des Projektes geplant. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die Zeitpunkte der Diplomarbeiten, die Aufgabenstellungen und die erreichte Abschlussnote der Studierenden.

Die Auswertung der Diplomarbeiten wurde auf Basis der schriftlichen Ausarbeitung, der regelmäßig vorgestellten Unterlagen sowie der Aufzeichnungen in Gesprächen durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung werden in den Abschnitten 5.2 bis 5.5 dargestellt. Im Abschnitt 5.1.1 ist das Auswertungsschema für alle Projekte beschrieben. In der Aufgabenstellung jedes Diplomanden war eine intensive Auseinandersetzung und Reflexion der Methodenanwendung gefordert, die für die Gesamtbewertung der Diplomarbeit gleichwertig mit dem konstruktiven Ergebnis behandelt wurde.

5.1.3 Schulung in Lösen technischer Gestaltungsprobleme

Insgesamt wurden im Zeitraum von eineinhalb Jahren ab Juli 2008 sechs Schulungen zum Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-A durchgeführt. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der Teilnehmer der Schulungen.

Das Vorgehen wurde anhand des in Abschnitt 2.4.3 aufgezeigten Beispiels erläutert und war Grundlage für moderierte Workshops zur Bearbeitung der Problemstellung. Die Problemstellung wurde in Gruppen von fünf bis sieben Personen bearbeitet und durch einen oder mehrere C&C-A Moderatoren geleitet. In allen sechs Schulungen wurde die folgende Problemstellung bearbeitet:

Betonanker werden entwickelt, um große Lasten an Betonwänden oder Säulen sicher zu befestigen. Bei Zertifizierungsversuchen der maximalen Haltekraft der

²⁶⁸ Siehe Abschnitt 2.4.3, S. 52ff

Betonanker (Abbildung 24) tritt eine große Streuung auf. Die niedrigste maximale Haltekraft aller Versuche bestimmt den Zertifizierungswert und ist das maßgebliche Verkaufsargument. Bei einzelnen Versuchen werden jedoch zum Teil maximale Haltekräfte gemessen, die mehr als das Zweifache des zertifizierten Wertes aufweisen.

Nr.	Zeitpunkt	Dauer	Anzahl Teilnehmer	Art der Teilnehmer	Ort der Durchführung
S1	Juli 2008	4h	9	Mitarbeiter IPEK ²⁶⁹ 0-5 Jahre Berufserfahrung	Seminarräume IPEK
S2	November 2008	8h	24	Mitarbeiter Industrieunternehmen 0 – 20 Jahre Berufserfahrung	Schulungsräume Industrieunternehmen
S3	Dezember 2008	4h	42	Studierenden im Hauptstudium, 7- 11 Semester	Seminarräume IPEK
S4	Juni 2009	4h	21	IPEK Mitarbeiter, 0-5 Jahre Berufserfahrung	Seminarräume IPEK
S5	Juli 2009	16h	14	14 Mitarbeiter 0-25 Jahre Berufserfahrung	Seminarraum eines Forschungs-instituts
S6	Januar 2010	8h	7	Ingenieure unterschiedlicher Fachrichtungen Masterstudiengang	Seminarräume IPEK

Tabelle 5: Übersicht Schulungen

Zu klären war, warum die Haltekraft eine solch große Streuung aufweist. Basierend auf dieser Erklärung sollten Ansätze gefunden werden, um die Haltekraft auf einem hohen Niveau zu homogenisieren.

Als Grundlage für die Bearbeitung der Problemstellung wurden den Schulungsteilnehmern Messprotokolle, exakte Beschreibungen des

²⁶⁹ IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe

Versuchsaufbaus und -durchführung sowie Videos der Zertifizierungsversuche zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurden einige Betonanker selbst, sowie Videos von Versuchen zur Erklärung des Sachverhaltes bereitgestellt.

Für die beschriebene Problemstellung gibt es keine Musterlösung, da diese aktuell in einem Industrieunternehmen bearbeitet wird.

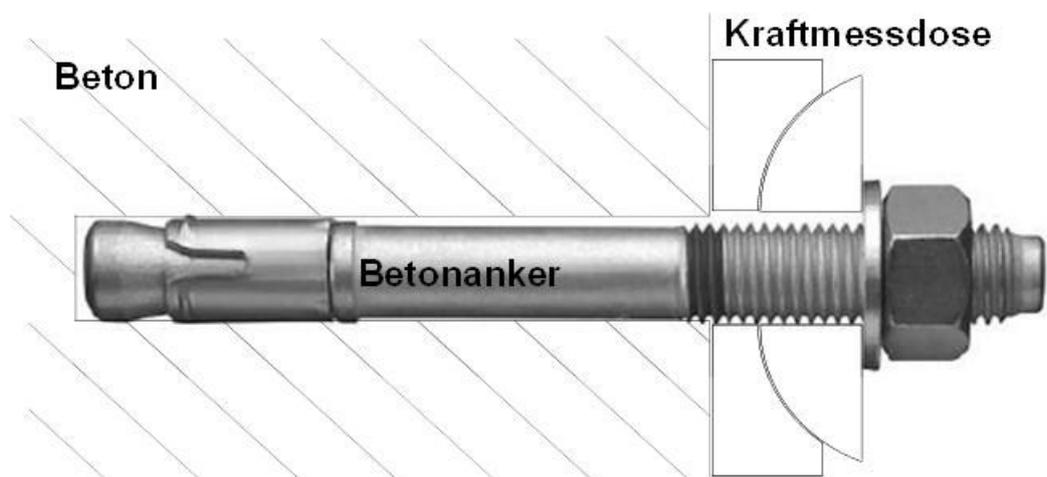


Abbildung 24: Betonanker mit Messdose

Alle Ergebnisse der Schulungworkshops wurden dokumentiert, sodass sowohl von der Erklärung der Streuung der maximalen Haltekraft als auch von den Lösungsansätzen unterschiedliche Dokumente und Aufzeichnungen vorliegen. Alle Schulungen wurden vom Autor dieser Arbeit hauptverantwortlich durchgeführt und er war außerdem immer in einer oder mehreren Gruppen als Moderator tätig. Die hierbei gesammelte Erfahrung zum Vorgehen wurde so weit als möglich schriftlich festgehalten.

Nach Durchführung der Schulung in Industrieunternehmen wurde für drei Entwicklungsingenieure die Anwendung des C&C-A innerhalb realer Entwicklungsprojekte im Unternehmen durch einen weiteren Mitarbeiter des IPEK weiterbegleitet. Des Weiteren wurden zwei der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Diplomarbeiten in diesem Unternehmen durchgeführt, sodass Entwicklungsingenieure vor Ort ebenfalls den C&C-A kennenlernten.

Die Schulung S2 und einzelne andere Projekte mit C&C-A wurden im Nachhinein durch einen Fragebogen zur Schulung, sowie durch 11 einstündige semistrukturierte Interviews im Juni 2009 in der Firma evaluiert. Diese Interviews wurden wortgetreu in eine Transkription überführt und für diese Arbeit ausgewertet. Der Bericht zur Evaluation der Schulung fließt ebenfalls in die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit

ein. Der Bericht hat maßgeblich zur Fokussierung auf das Thema Funktionen in dieser Arbeit beigetragen²⁷⁰.

5.1.4 Entwicklungsprojekte mit dem C&C-Ansatz

In zwei Industrieunternehmen wurden für konkrete Problemstellungen Lösungen gesucht. Folgende Problemstellungen wurden bearbeitet.

Problemstellung E1: Gleitlagerdefekte bei Motorbauteilen: Bei der Montage von Elektromotoren in einem Gehäuse treten inakzeptabel hohe Ausschussraten aufgrund blockierender Motorwellen auf. Aufgabe ist es, die Ursachen für das Verklemmen zu finden und darzustellen. Weiterhin sollten Alternativen aufgezeigt werden, wie das Problem beseitigt oder zumindest deutlich verringert werden kann.

Problemstellung E2: Entwicklung von Lagerungs- und Antriebstechnik für eine Anlage zur Betonherstellung: Unter dem gegebenen Belastungskollektiv tritt ein zu hoher Verschleiß an den eingesetzten Gleitführungselementen auf, der einen Austausch einzelner Elemente nach ein bis zwei Jahren Betriebsdauer notwendig macht. Die geforderte und berechnete Betriebsdauer beträgt drei Jahre.

Für die Bearbeitung der Projekte stand umfangreiches Material zum technischen Sachverhalt zur Verfügung. Dies sind beispielsweise Messprotokolle, Videos oder Fotos von Versuchen, Montage oder dem Betrieb. Ein Mitarbeiter der Industrieunternehmen stand für die Beantwortung aller auftretenden Fragen bereit.

Die Vorgehensweise und die Ergebnisse von E1 wurden bereits aufgearbeitet und durch ALBERS²⁷¹ und den Autor dieser Arbeit veröffentlicht. Die dort gewonnenen Ergebnisse fließen mit in diese Arbeit ein. Die Auswertung von E2 basiert auf dem abgegebenen Entwicklungsbericht. Der Autor dieser Arbeit war direkt an Ursachensuche und Lösungsfindung in E1 und E2 beteiligt, sodass zum methodischen Vorgehen auch hier Notizen bestehen. Die Forscher waren direkte Projektbearbeiter. Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die beiden Projekte.

Nr.	Zeitpunkt	Dauer	Personalaufwand	Anzahl Bearbeiter
E1	Juli 2006	1 Monat	1 Mannmonat	3 IPEK Mitarbeiter
E2	März 2009	6 Monate	4 Mannmonate	3 IPEK Mitarbeiter

Tabelle 6: Übersicht Entwicklungsprojekte

²⁷⁰ Siehe Abschnitt 4.2, S. 69ff

²⁷¹ (Albers, et al., 2007)

5.1.5 Forschungsworkshops

Im Laufe von zwei Jahren wurden ab Oktober 2006 vier Forschungsworkshops durchgeführt. Ziel war es, aktuelle methodische Fragestellungen zum C&C-Ansatz unabhängig von den technischen Aufgabestellungen der Projekte zu diskutieren. Teilnehmer waren jeweils ca. 20 Ingenieure aus Industrie und Forschung.

Nr.	Zeitpunkt	Dauer	Anzahl der Teilnehmer
F1	Oktober 2006	8h	9
F2	Mai 2007	8h	24
F3	Oktober 2007	8h	42
F4	Mai 2008	8h	21

Tabelle 7: Übersicht Forschungsworkshops

Die Workshops hatten verschiedene thematische Schwerpunkte:

Leitthema F1: 1. Erstellung eines Vorgehensmodell (später Leitfaden²⁷² genannt) zum Aufbau einer C&C-A Problembeschreibung basierend auf gemeinsamen Erfahrungen. 2. Umfassendes Verständnis gemäß SPALTEN²⁷³ erarbeiten. 3. Überblick über verschiedene Darstellungsweisen des C&C-A, Erarbeitung einer Regelbasis für die Darstellung.

Leitthema F2: Erweiterung und Ergänzung des Leitfadens zu C&C-A (entstanden nach Workshop1) mit Fokus auf der Erweiterung der Grundhypothese II in der Basisdefinition.

Leitthema F3: Evaluation und Ergänzung des Leitfadens mit dem Schwerpunkt der Darstellung zeitlicher Abfolgen von Funktionen (Sequenzmodell).

Leitthema F4: Klärung und Definition von Begriffen im Umfeld von Funktion, ausgehend davon, dass die *Unschärfe* der Definition von Funktion eine einfache Anwendung des C&C-Ansatzes behindert.

Die in Abschnitt 4.2 aufgezeigte laufende Auswertung der Projekte wurde für die Forschungsworkshops bereits im Mai 2008 auf das Thema Funktionen im C&C-Ansatz fokussiert. Dies wird aus der Beschreibung der Themenüberschriften für die eintägigen Workshops ersichtlich, da die Inhalte der Workshops zunehmend

²⁷² Der Leitfaden gibt Anweisung wie ein C&C-Modell aufzubauen ist, veröffentlicht in (Albers, et al., 2008b)

²⁷³ Siehe Abschnitt 2.4.3

Funktion im C&C-Ansatz in den Mittelpunkt stellen. Nach der Durchführung der Schulungen und der Auswertung der Interviews²⁷⁴ im Juni 2009 wurde auf Basis der Aussagen der Entwicklungsingenieure und C&C-Anwender endgültig auf dieses Thema fokussiert. Alle während der Workshops entstandenen Aufzeichnungen, Ergebnisse der Gruppenarbeit und die im Nachgang eines jeden Workshops erstellten Protokolle wurden hierzu ausgewertet.

²⁷⁴ Siehe Abschnitt 5.1.3

5.2 Unterschiedliche Auffassungen²⁷⁵ von Funktion

Im Kapitel Stand der Forschung wurde die 6-Kern-Konzepte Beschreibung für Produkte als Methode zur Einordnung unterschiedlicher Bedeutungen von Funktion aufgezeigt²⁷⁶. Auch in diesem Abschnitt werden die in den Projekten beobachteten Auffassungen von Funktion in denselben Rahmen von Zielen, Aktionen, Funktion, Verhalten und Struktur/Gestalt eingeordnet und zusammen mit der jeweiligen Aktivität, in der sie auftreten, beschrieben.

Im folgenden Abschnitt 5.2.1 werden die beobachteten Auffassungen von Funktion in jeweils einzelnen Abschnitten beschrieben.

5.2.1 Transformation von Flussgrößen

Funktionen als Transformation von Flussgrößen zu formulieren und zu strukturieren, tritt in Verbindung mit dem C&C-Ansatz am häufigsten auf²⁷⁷. Jedoch werden die transformierten Flüsse aus Material, Energie und Information oft zwischen dem Eingang und dem Ausgang einer Blackbox betrachtet. Abbildung 25, die in der Diplomarbeit DA1 erstellt wurde, zeigt den Papieranleger einer Bogenoffsetdruckmaschine²⁷⁸ mit der Funktion *Bogen ausrichten und auf Maschinengeschwindigkeit beschleunigen*. Auf der linken Seite ist die durch drei WFP (WFP1, WFP2 und WFP3) eingegrenzte Funktion des Anlegers hervorgehoben. Diese WFP trennen das betrachtete System von der nicht zu betrachtenden Struktur. Die Funktion des Systems ist in Abbildung 35, rechts als Transformation der eingehenden Material-, Energie-, und Informationsflüsse, die verändert aus dem System heraustreten dargestellt. Im Falle der Bogenoffsetdruckmaschine besteht der Materialfluss aus Papierbögen, die innerhalb des Systems ausgerichtet werden und dann an ein Druckwerk weitergeleitet werden.

Der Diplomand setzt die Blackbox gleich mit einer durch WFP auf der Gestalt lokalisierten Systemgrenze, da die Blackbox Beschreibung mit der Darstellung der Flussgrößen in außen an der Black angeordneten Pfeilen diese Analogie begünstigt. Die Pfeile zeigen an, dass die Flussgrößen auf der einen Seite in das System hinein und auf der anderen Seite wieder austreten. Der Diplomand eignet sich diese Konvention an und wendet sie mit dem C&C-Ansatz auf des Anleger der

²⁷⁵ Als Auffassung wird in dieser Arbeit das bezeichnet, was die Probanden und Projektbearbeiter meinen unter Funktion zu verstehen. Wie im Lauf der Arbeit gezeigt wird richtet sich diese Meinung entweder auf die Bedeutung, die Darstellung oder die Formulierung von Funktion

²⁷⁶ Abschnitt 2.3, (Vermaas, 2010)

²⁷⁷ Siehe Abschnitt 2.4.4, die Basisdefinition des C&C-Ansatzes sieht diese Auffassung vor.

²⁷⁸ In Kooperation mit diesem Unternehmen wurden drei Diplomarbeiten durchgeführt, siehe Abschnitt 5.1.2, S. 79

Druckmaschine an. Er erstellt ein C&C-Modell, *durch* dessen WFP und LSS Papierbögen bei der Ausrichtung *hindurchfließen*. Das System ist so dargestellt, dass in den WFP1 und WFP2 keine Wechselwirkung stattfindet. Dies widerspricht der ersten Grundhypothese²⁷⁹ und ist somit falsch.

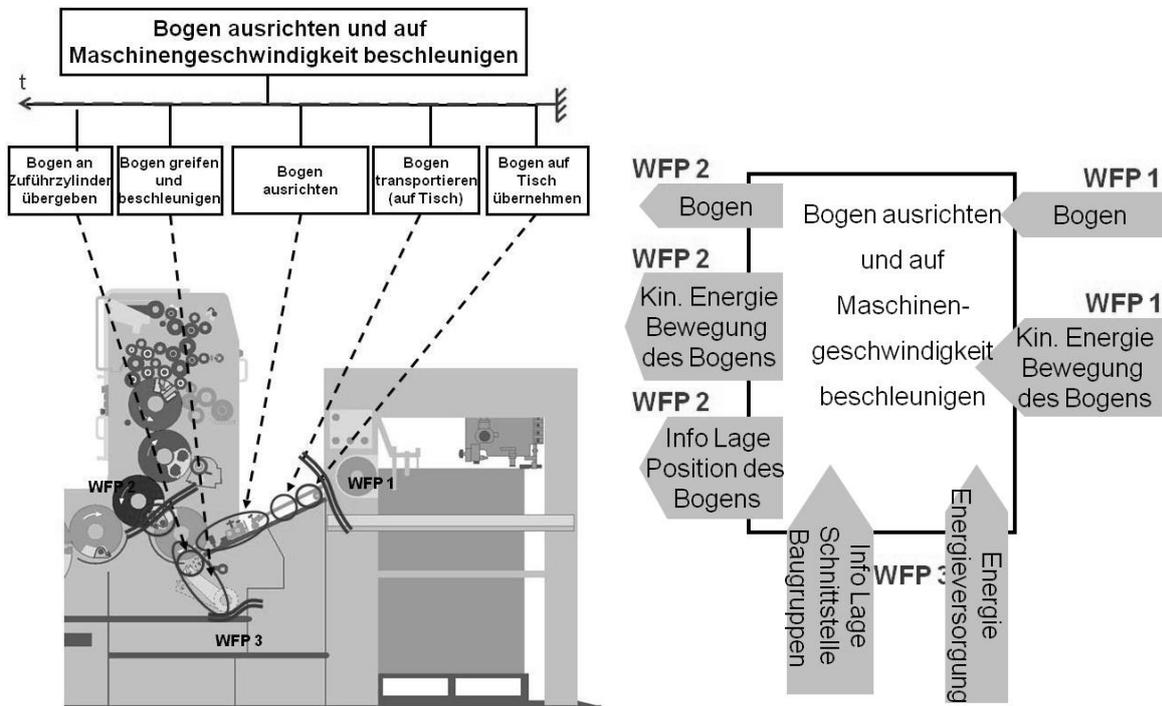


Abbildung 25: Funktionen des Anlegers einer Bogenoffsetdruckmaschine aus DA1²⁸⁰

Die WFP können auf diese Art und Weise nicht auf der Gestalt lokalisiert werden. Sie entsprechen einer abstrakten Systemgrenze. WFP1, WFP2 und WFP3 in Abbildung 25 ersetzen die, in der Blackbox als schwarzer Rahmen dargestellte Systemgrenze. Die WFP markieren qualitativ die Orte, an denen die Flussgrößen in das System hinein und wieder aus dem System heraustreten. Die Blackbox-Darstellung eignet sich gut für die schnelle und abstrakte Einteilung des Systems in Teilsysteme. Der Diplomand war hiermit zunächst erfolgreich.

Im nächsten Schritt versuchte er die Gestalt des Systems genau zu verstehen. Er erkannte, dass der Papierbogen gar nicht *in das System hinein* geht, sondern *auf dem System* bleibt. Auf der dargestellten, übergeordneten Betrachtungsebene, scheinen die Papierbögen zwar *in das System hineinzugehen*, jedoch zieht die Maschine den Bogen nicht ein, sie greift diesen und ändert seine Position, sie *interagiert* mit ihm. Die Papierbögen fließen nicht durch die WFP und LSS *hindurch*,

²⁷⁹ ein Effekt (z. B. Reibung, Keileffekt, Kraftübertragung, Informationsübertragung, ...) kann nur dann stattfinden, wenn eine Wirkfläche (WF) des betrachteten Systems in Kontakt mit einer Wirkfläche eines benachbarten System steht, d. h. ein Wirkflächenpaar (WFP) bildet.

²⁸⁰ Abschnitt 5.1.2, Seite 79

sondern werden mit Hilfe von WFP und LSS durch die Maschine befördert und es wird eine Funktion *an ihnen* ausgeübt.

Die Blackboxdarstellung erzeugt ein Missverständnis. Der Diplomand DA1 fokussiert sich auf die Funktion *Bogen ausrichten*, welche Hauptursache für die Limitierung der maximalen Maschinengeschwindigkeit ist. In Abbildung 25 ist diese Funktion durch den von rechts gesehen zweiten Kreis angedeutet. Auch durch dieses Teilsystem muss der Bogen *hindurch*, da dieser nach der Erfüllung der Funktion wieder benötigt wird.

Der Proband bricht nun die Teilfunktion *Bogen ausrichten* in weitere Teilsysteme herunter, da er die Ursache für die Limitierung der Maschinengeschwindigkeit begründen möchte (siehe Abbildung 26).

Bogen ansaugen → WFP 203 kommt hinzu

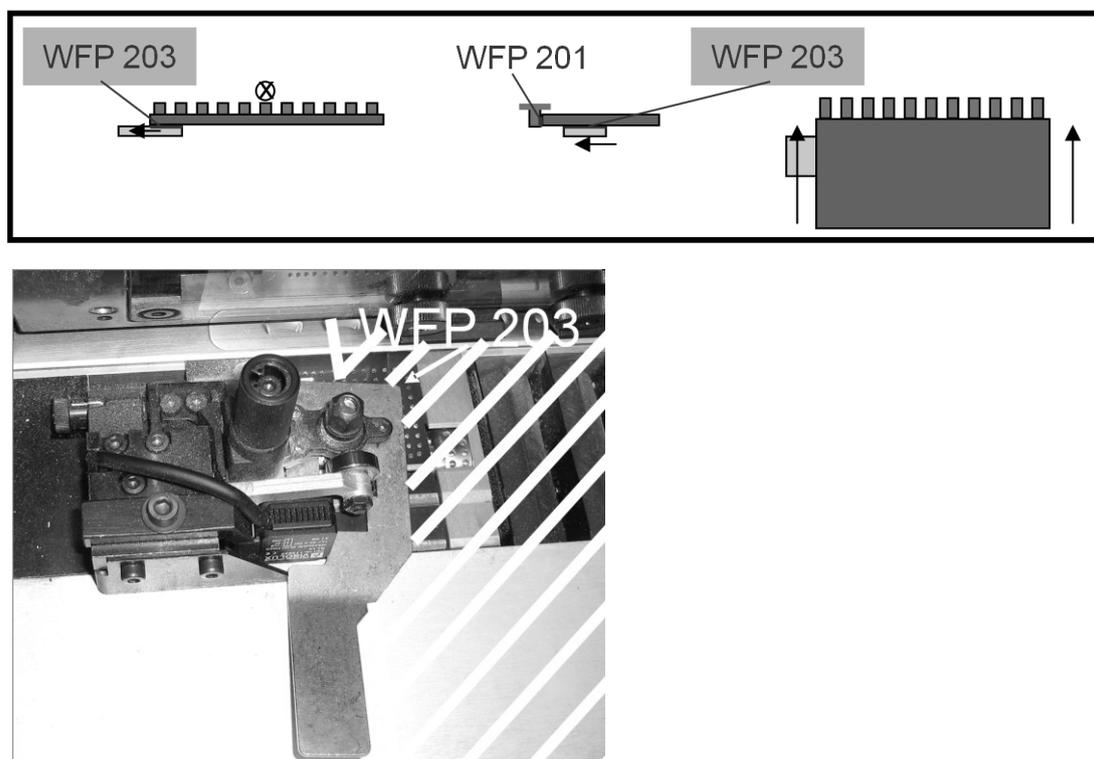


Abbildung 26: Detaillierte Betrachtung der Funktion „Bogen ausrichten“

Auf dieser Ebene muss der Diplomand die WFP genau bestimmen, diese lokalisieren und deren Gestalt bewerten. Für die Funktion *Bogen ansaugen* ist in Abbildung 26 gezeigt, wie er die WFP exakt bestimmt. Der Diplomand identifiziert jedes WFP zwischen dem Anleger der Druckmaschine und dem Papierbogen. Hierbei interagiert die Druckmaschine in jedem Falle mit dem Papierbogen. Die Analogie zur Blackbox auf der übergeordneten Ebene ist hier nicht mehr anwendbar, auf dieser Betrachtungsebene kann kein Papierbogen *durch* ein WFP *hindurchfließen*. Auf übergeordneter Betrachtungsebene ist die angewandte Auffassung von Funktion als

Black Box, die beim Beziehen auf die Gestalt durch WFP ersetzt wird noch anwendbar. Sie scheitert jedoch in diesem Beispiel und auch in einigen weiteren Projekten auf der konkreteren Ebene, da es für die Erarbeitung des Systemverständnisses notwendig ist, die wirkliche Gestalt der WFP zu analysieren.

Das Problem tritt dann ein, wenn Anwender WFP als Systemgrenze betrachten und die Konvention Funktion als Blackbox darzustellen mit WFP ersetzen wollen.

Des Weiteren zeigt die Auswertung der Projekte, dass dieses Problem nur bei Systemen auftritt, deren Beschreibung die Modellierung eines Materialflusses erfordert. Dies sind DA6, DA5, DA4, DA3, DA9²⁸¹. Bei den Schulungen, Entwicklungsprojekten und dem Forschungsworkshop wurde dieses Problem durch den Autor dieser Arbeit vermieden oder es war kein Materialfluss zu modellieren. Bei der Beschreibung der Funktion über Flussgrößen mit Energie- und Informationsfluss tritt dieses falsche Verständnis von nicht interagierenden WFP nicht auf²⁸².

Diese Auffassung führt also dann zu Problemen, wenn die Flussgrößen ausschließlich mit der Blackbox-Darstellung in Verbindung gebracht werden. Die Blackbox ist eine abstrakte Konvention zum Darstellen lösungsneutraler Funktionen, jedoch darf die nicht dazu führen, dass bei der Flussgrößenbetrachtung der Interaktionscharakter von WFP verloren geht.

5.2.2 Funktion als Zustandsänderung

Durch die Auswertung der Projekte konnte mehrfach die Auffassung von Funktion eines technischen Systems als Zustandsänderung beobachtet werden. Hierbei wird mit Funktion kein Vorgang beschrieben, sondern zeitlich getrennte Zustände, die durch einen Vorgang ineinander überführt werden. Dies umfasst einen Ausgangszustand, der durch ein Mittel in einen gewünschten Endzustand zu überführen ist²⁸³. In der 6-Kern-Konzepte-Beschreibung von VERMAAS²⁸⁴ entspricht diese Bedeutung von Funktion den Zielen. Die Funktionsbeschreibung beinhaltet ein Potenzial, das sich auf eine IST Situation und eine SOLL-Situation bezieht. Die SOLL-Situation beschreibt eine gewünschte Situation in der Zukunft, also ein Ziel.

²⁸¹ Siehe Abschnitt 5.1.2

²⁸² Schlussfolgerungen werden in Kapitel 7 gezogen, da sich dieser Sachverhalt auch im Experiment aus Kapitel 6 zeigt.

²⁸³ ALBERS beschreibt diese Art von Funktion im Zusammenhang mit Zielen. Der Zusammenhang von Zielen und Funktionen wird erörtert und es wird dargelegt, wie Ziele und Funktionen zum Steuern von Entwicklungsprozessen für die Entwicklungsingenieure „greifbarer“, damit transparenter und somit der Verlauf des Prozesses sicherer gemacht werden kann. (Albers, et al., 2010)

²⁸⁴ Abschnitt 2.3.4, Seite 29

Das folgende Beispiel aus der Auswertung der Projekte soll diesen Sachverhalt verdeutlichen: Abbildung 27 zeigt das Resultat aus einem Forschungsworkshop²⁸⁵. Die betrachtete Funktion ist *Trennen von zwei Bauteilen nach dem Urformen-Gießen*.

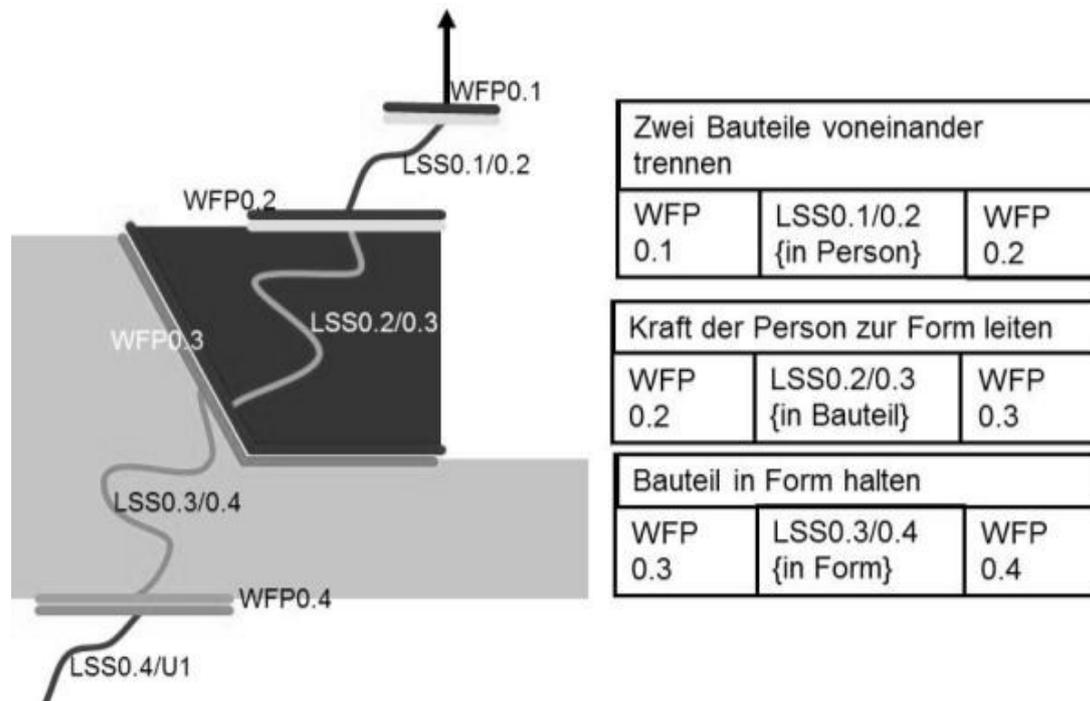


Abbildung 27: Funktionsbeschreibung als Zustandsänderung²⁸⁶

Diese Funktion wird durch eine interagierende Person erfüllt, die *das urgeformte Bauteil aus seiner Form zieht*. Die Funktion im Sinne von Ziel *Trennen von zwei Bauteilen* wurde zunächst auf den Zustand vor und den Zustand nach dem Trennen der Bauteile bezogen. Der Zustand zu Beginn kann mit *Bauteil ist gegossen und steckt in der Form* beschrieben werden, der Zustand nach dem Entformen kann mit *das Bauteil ist ausgeformt* beschrieben werden. Wird die Funktion als die Überführung des ersten Zustandes in den zweiten Zustand aufgefasst, gelingt es nicht für diese Funktion zwei WFP und verbindende LSS zu finden, da sich die Zustände auf unterschiedliche Zeitpunkte beziehen. Wird der gewünschte Zustand erreicht, wurde bereits eine Funktion erfüllt. Der Vorgang ist abgeschlossen, es passiert nichts mehr, es existieren keine WFP und keine LSS mehr. Es gelingt nur das C&C-Modell aufzubauen, wenn eine Funktion bestimmt wird, die im Moment der Betrachtung erfüllt wird. Wird versucht, die Funktion im Sinne der Zustandsänderung von Ausgangs- zu gewünschtem End-Zustand mit dem C&C-Ansatz zu beschreiben,

²⁸⁵ Beschreibung Abschnitt 5.1.5

²⁸⁶ Die Abbildung ist auf Basis der im Forschungsworkshop entstanden Skizzen nachgebaut

schlägt dies fehl. Im Beispiel *Trennen von zwei Bauteilen* wird die Funktion solange erfüllt, wie der Arbeiter in WFP0.2 am Bauteil zieht und solange im WFP0.3 zwischen Gussform und Bauteil eine Kraft übertragen wird. Löst sich das Bauteil aus der Form, ist die Funktion erfüllt. Die Funktion ist abgeschlossen, der angestrebte zweite Zustand ist erreicht. Diese Auffassung von Funktion und der Versuch dies mit dem C&C-Ansatz darzustellen, wurde in dem Projekten F4, DA4, DA5, DA6, S2, F4 vertreten.

Funktion sollte für den C&C-Ansatz nicht als etwas Potenzielles, sondern als ein Vorgang angesehen werden²⁸⁷.

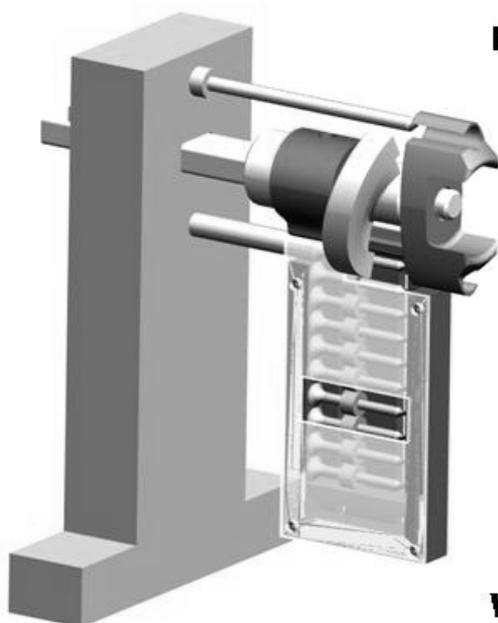
5.2.3 Funktion als passive Reaktion und in Bauteilbeschreibungen

Durch die Auswertung der Projekte konnte mehrfach die Beschreibung von Funktion als eine passive Reaktion eines Bauteils beobachtet werden. Des Weiteren wurden Funktionsbeschreibungen in der Benennung von Bauteilen oder Baugruppen beobachtet.

Funktion als *passive Reaktion* eines Bauteils wird im Folgenden mithilfe eines in DA8 erstellten Modells erklärt. Abbildung 28 zeigt ein Modell zur Veranschaulichung eines Mechanismus für die Funktion *Schrauben aus der Magazinierung vereinzeln und für die Verschraubung vorbereiten*. Die Funktion des Systems ist als eine Abfolge von Vorgängen beschrieben, die mit den einzelnen Bauteilen und Baugruppen des Systems *passieren*. Der Begriff *passieren* wird deshalb gewählt, weil unklar ist wer den Vorgang veranlasst, beispielsweise wenn der *Schlitten eingefahren wird*. D. h., die Funktion ist aus Sicht des Teilsystems, auf das die Funktion ausgeübt wird passiv beschrieben. Die Funktion wird so formuliert, dass sie sich auf ein System bezieht, das ein Nachbarsystem des passiv reagierenden Systems ist oder in der Abbildung gar nicht dargestellt ist. Dies ist im Falle von „Schlitten wird eingefahren“ der Anwender.

Die zweite Funktion im dargestellten Ablauf ist in derselben Art und Weise formuliert (siehe Abbildung 28). Sie beschreibt, dass die *Schraube in den Revolver geschoben* wird. Welches Teilsystem diese Funktion erfüllt, geht aus der Beschreibung ebenfalls nicht hervor. Es ist der Beschreibung nicht zu entnehmen, wie die Schraube in den Revolver gelangt. Diese Funktion wird nicht mehr durch den Anwender erfüllt, sondern durch ein abgebildetes Teilsystem, das jedoch nicht benannt wird.

²⁸⁷ Diese Schlussfolgerung wird in Abschnitt 7.1.2 vertieft, nachdem die alle Ergebnisse der Auswertung beschrieben sind.



Funktionsweise:

- **Schlitten wird eingefahren**
- **Schraube in Revolver geschoben**
- **Schlitten fährt in Tiefenanschlag**
- **Schlitten fährt wieder aus (Federkraft)**
- **Revolver dreht sich**
- **Schraube wird in Position geschoben**

Wie könnte eine Magazinierung aussehen?

Abbildung 28: Beschreibung der Funktion als passive Reaktion der Bauteile (aus DA8)

Aus der Formulierung der vierten Funktion ist dem in Klammer stehenden Zusatz zu entnehmen, dass eine eingebaute Feder dafür sorgt, dass der *Schlitten wieder ausfährt*. Mit diesem Zusatz stellt der Diplomand einen Zusammenhang zwischen Teilsystemen her, der bei keiner der anderen Beschreibungen direkt beschrieben ist. Alle Funktionen in Abbildung 28, bis auf die Andeutung bei der 4. Funktion, sind passiv und Bauteil-isoliert formuliert. Es werden keine funktionalen Zusammenhänge deutlich.

Die Funktionsbeschreibung über die Bauteilbenennung wird durch die folgenden Beispiele aus der Auswertung der Projekte erklärt:

Mit dem Zusatz *Federkraft* formuliert der Diplomand in Abbildung 28 die Funktion über eine Bauteilbeschreibung. Die Beschreibung der Gestalt (Feder) wird mit einer Tätigkeit (Kraft ausüben) vermischt. Es entsteht eine Art funktionale Bauteilbeschreibung für das zu erwartende Verhalten des Systems. Diese lässt keine Rückschlüsse über die zur Funktionserfüllung notwendigen, interagierenden Nachbarsysteme zu. Ein weiteres Beispiel hierzu ist in Abbildung 29 dargestellt. Die Funktion Nr.9: *Bogen ansaugen und greifen* wird durch einen Hubsauger erfüllt. Die Beschreibung des Systems als Hubsauger²⁸⁸ ist wieder eine funktionale Bauteilbeschreibung.

²⁸⁸ Der Hubsauger ist in Abbildung 2, S.5 dargestellt.

Diese Art der Formulierung wird in den meisten Fällen mit einem Nomen durchgeführt. Sie lässt aber selten Rückschlüsse zu, auf was die Funktion ausgeübt wird. Dies ist in diesem Falle der Papierbogen.

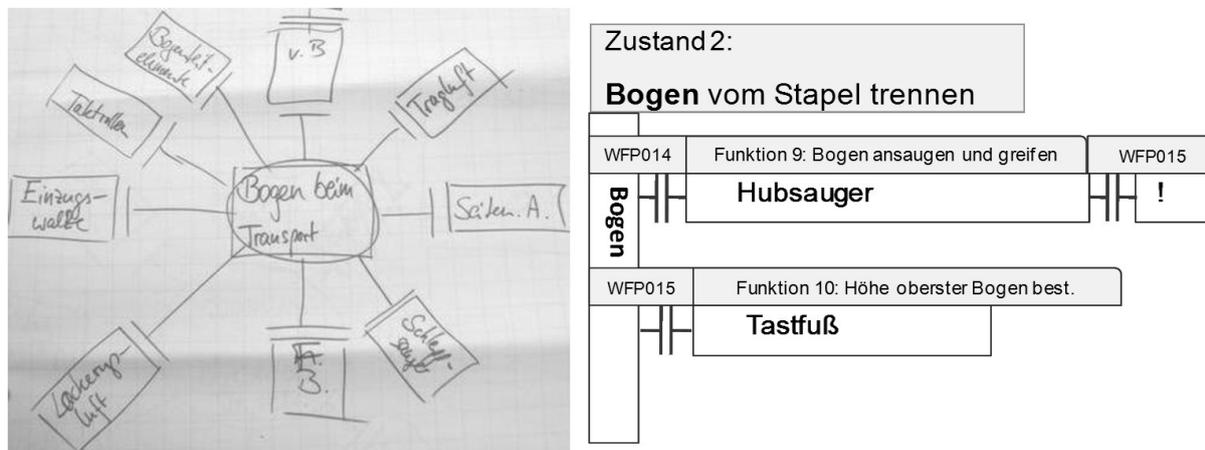


Abbildung 29: Funktionale Bauteilbeschreibung bei der Papiervereinzelung (aus DA3)

Die Formulierung als passive Reaktion eines Bauteils sollte vermieden werden, da diese Formulierung die Zusammenhänge im System verschleiert. Die Bauteilbeschreibung mit Andeutung der Funktion ist keine Formulierung von Funktion. Dies wird in den Projekten auch nicht so wahrgenommen. Sie wird verwendet, um die räumliche Anordnung von Bauteilen zu beschreiben und ist hierzu auch nützlich. Jedoch sollte Funktion so nicht aufgefasst werden, da auch hier die Zusammenhänge im System verschleiert werden.

5.2.4 Funktion als substantiviertes Verb ohne Zuordnung

Im Gegensatz zur Formulierung von Funktionen in Bauteilbeschreibungen wird bei der Substantivierung der Fokus der Beschreibung auf die Operation²⁸⁹ gelegt. Die Funktion beinhaltet vorrangig also eine Beschreibung von dem, was passiert. Es geht aus dieser Formulierung somit mit nicht hervor, von welchem Teilsystem die Funktion erfüllt wird.

Abbildung 30 zeigt zwei Beispiele aus der Beschreibung von Trockenbauschrauben²⁹⁰. Im Fall, der links in der Abbildung gezeigt ist, bleibt unklar, ob der Bit oder die Schraube selbst für die *Klemmung der Schrauben* verantwortlich ist. Die Abbildung lässt den Schluss zu, dass mit *Klemmung Schraube festklemmen* gemeint ist. Dies ergibt sich auch aus der Entwicklungsaufgabe. Die Funktion wird

²⁸⁹ Operation in Sinne von (Ehrlenspiel, 2003), der eine Funktion aus einem Operanden und einer Operation zusammensetzt

²⁹⁰ DA1 und DA2 in Abschnitt 5.1.2. Ziel ist es das Einschraubverhalten der Trockenbauschrauben zu verbessern.

also durch den Bit erfüllt, der die Funktion auf die Schraube ausübt. Die Schraube kann keine Funktion mit sich selbst ausführen²⁹¹.

Diese Art der Formulierung tritt oftmals im Zusammenspiel mit der Zuweisung einer Funktion zu einem einzelnen WFP auf. Ursache hierfür ist die Fokussierung auf eine spezielle Schnittstelle. Ganz bewusst fokussierten die Probanden auf einzelne WFP, da ihre Aufgabe war, die Vorgänge an dieser Stelle zu bestimmen. Die Formulierung der Funktion mit einem substantivierten Verb ist eine Zuweisung der Funktion zu einem einzelnen WFP. Es wird also auch das, was in einem WFP „passiert“ als Funktion aufgefasst, da kein anderes methodisches Mittel bereitsteht.

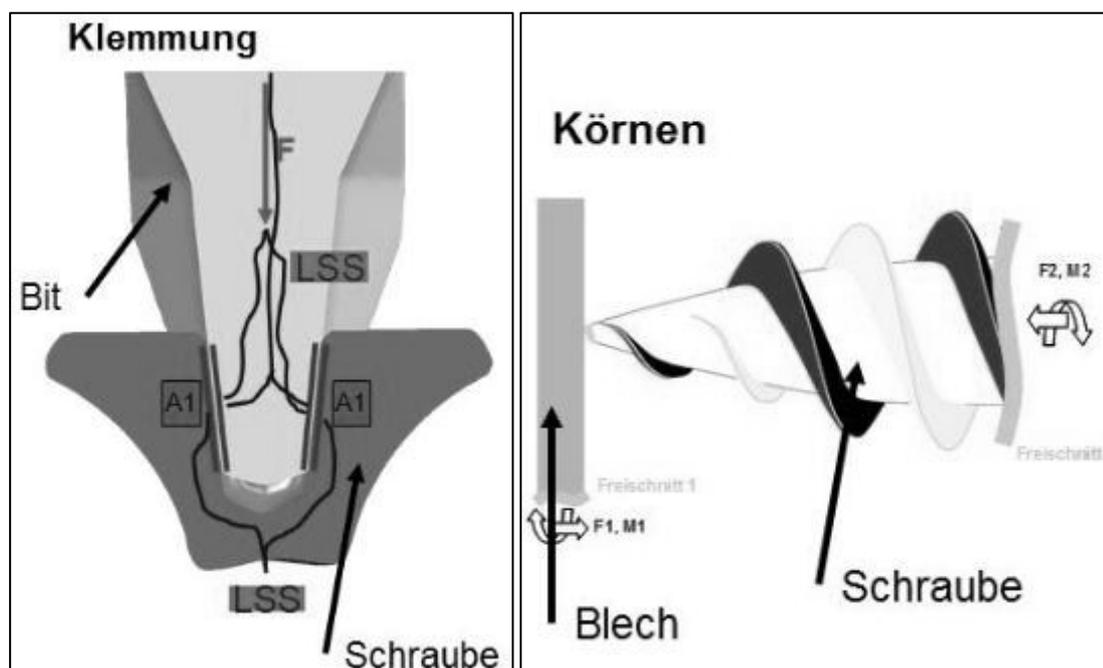


Abbildung 30: Beschreibung der Funktion mit einem substantivierten Verb (DA2 und DA1)

Die Formulierung als *Klemmung* oder *Körnen* (Abbildung 30-rechts), beschreibt einen Vorgang, der zwischen zwei Systemen passiert, wobei die Art und Weise der Kraftübertragung beschrieben wird. *Klemmen* bedeutet, dass zwei Bauteile durch Reibung zusammengehalten werden. *Körnen* bedeutet, dass die die Kraft punktuell derart konzentriert wird, dass das Material in einem gewissen Maße an der einen Seite verdrängt wird.

Was an dieser einen Stelle passiert, hängt jedoch auch davon ab, was an weiteren WFP und LSS *passiert*. Diese sind in den Abbildungen der Diplomanden nicht dargestellt. Es besteht also ein Unterschied zwischen dem Einzelnen und wie dieses mit anderen Einzelnen zusammenhängt. Die als Funktion bezeichneten Vorgänge

²⁹¹ Siehe hierzu auch Abschnitt 5.4.4 „Funktionslogische Fehler“

sind demnach keine Funktionen. Dieser Unterschied wird auch deutlich, wenn man annimmt, dass ein Effekt in einem einzelnen WFP oder einer einzelnen LSS stattfinden kann, eine Funktion aber die Kombination aus diesen Effekten darstellt.

5.2.5 Wie der Anwender (das Nachbarsystem) auf das System wirkt

Für die systematische Eingrenzung des Problems wurde von ALBERS ET AL das Sequenzmodell²⁹² entwickelt. Dieses Sequenzmodell beschreibt zeitlich nacheinander ablaufende Funktionen, sodass die Funktionen des Systems auch zeitlich segmentiert betrachtet werden. Daher konnte die Anwendung des Sequenzmodells bei der Auswertung der Projekte beobachtet werden.

Bei der Analyse von technischen Systemen wird nach möglichen Situationen gesucht, die Ursache für auftretende Probleme sind. Diese Ursachen können zu einem früheren Zeitpunkt als das Problem selbst auftreten. Abbildung 31 zeigt ein C&C-Sequenzmodell des Betonankers²⁹³, das in der Schulung S4²⁹⁴ erstellt wurde. Alle Vorgänge beim Setzen des Betonankers werden in Betracht gezogen, um das Ziel des Projektes²⁹⁵ zu erreichen. Die Messungen der Auszugskraft werden vorgenommen während der „Betonanker angezogen“ wird (dritter Zustand) und sind abgeschlossen, wenn der Betonanker in seinen „Betriebszustand“ (vierter Zustand) überführt wurde (wenn das zu befestigende Nachbarsystem fixiert ist). Im Betriebszustand, der mit der Funktion „Bauteil X an einer Betonwand festklemmen“ formuliert wurde, existieren zwei WFP. Diese befinden sich zwischen Beton und Betonanker und zwischen Betonanker und festzuklappendem Bauteil (Abbildung 31).

Die vorhergehenden Zustände „Loch bohren“, „Einführen“ und „Anziehen“ beziehen sich jedoch auf Aktionen, die der Anwender mit dem Betonanker ausführt, um den Betriebszustand herzustellen. Die Schulungsteilnehmer beschreiben in diesem Beispiel eine Tätigkeit des benachbarten Systems. Diese wird ebenfalls mit WFP und LSS auf die Gestalt des Betonankers bezogen. Der Betonanker ist beim Bohren zwar nicht als Teil des betrachteten Systems, zum Zeitpunkt des Bohrens wird jedoch die Wirkfläche (WF) generiert, die später Teil des WFP1 zwischen Betonanker und Beton wurde. Für die Schulungsteilnehmer bildete diese Wirkfläche die Ausgangssituation für die Lokalisierung des Problems: bei einem schräg gebohrten Loch sind die Wirkflächen und damit auch das spätere WFP1 schief angeordnet und können

²⁹² (Albers, et al., 2008)

²⁹³ Betonanker war Inhalt von 6 Schulungen, detaillierte Beschreibung, siehe Abschnitt 5.1.3, S.81.

²⁹⁴ Beschreibung siehe Abschnitt 5.1.3, S.81ff

²⁹⁵ Erklärung der Streuung der Auszugskraft bei Zertifizierungsversuchen, siehe Abschnitt 5.1.3

dadurch ihre Funktion nicht vollständig erfüllen. Als Problemhypothese wird somit festgehalten: Die Streuung der maximalen Auszugskraft hängt linear mit der Streuung der Geometrie der Bohrungen zusammen.

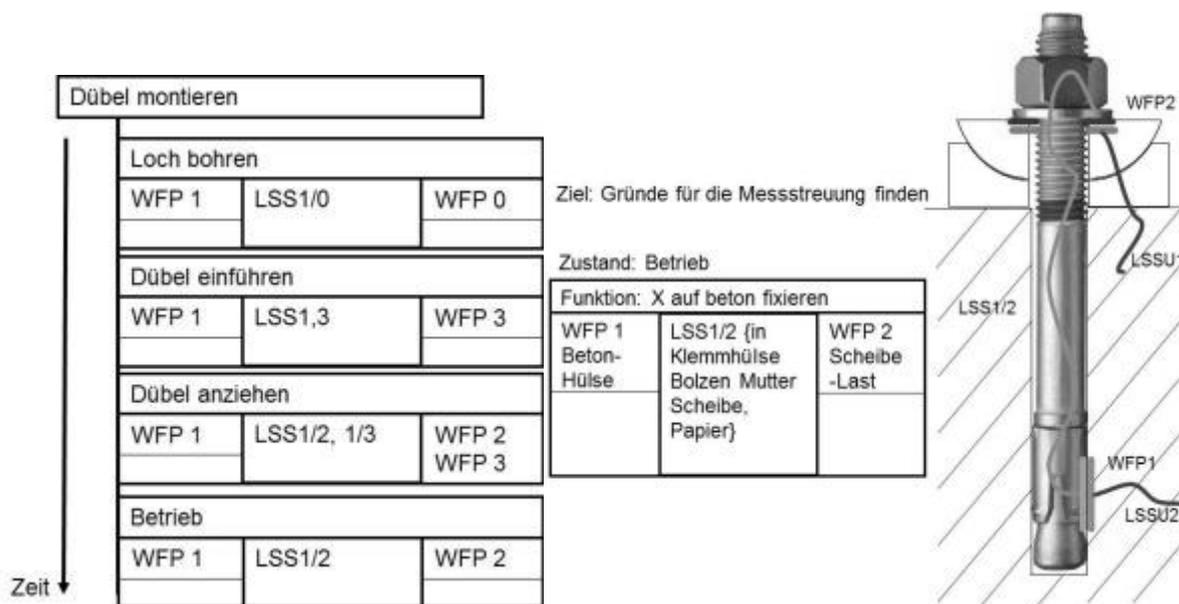


Abbildung 31: Beschreibung des Betonankers einer Gruppe aus der Schulung S4 (aufbereitet)

Diese Formulierung von Zuständen ist sehr hilfreich, da somit dafür gesorgt werden kann, dass das Problem zeitlich betrachtet wird. In den moderierten Gruppen der Schulungen²⁹⁶ wurde hierzu immer die Frage gestellt „Was passiert mit dem Betonanker, bevor er gesetzt ist?“ In der 5-Kern-Konzepte Beschreibung von VERMAAS²⁹⁷ entspricht diese Art der Formulierung von Funktion den Aktionen. In dem 5-Kern-Konzepte Modell würde diese Art der Beschreibung nicht als Funktion bezeichnet werden, sondern als eine vom Anwender mit dem System ausgeführte Aktion. Es gibt jedoch einen Zusammenhang zwischen Aktion und Funktion, da während der Aktion des Anwenders vom System Funktionen erfüllt werden. Diese Funktionen müssen stattfinden, damit die Aktionen ausgeführt werden können. Dies zeigt den Interaktionscharakter von Funktion. Es zeigt sich also, dass diese beiden unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion benötigt werden, um den Sachverhalt zu bearbeiten. Die beiden Bedeutungen wurden in dem oben beschriebenen Beispiel, aber auch in den Projekten DA1, DA2 DA5 DA7, DA8, E1, S1 bis S6 und F4²⁹⁸ in den Forschungsworkshops vermischt angewandt. Die Schlussfolgerungen sind in Abschnitt 7.1 erklärt, da dort ebenfalls noch die Ergebnisse der Auswertung des Experimentes aus Kapitel 6 einfließen.

²⁹⁶ Abschnitt 5.1.3 und 5.1.4, Seite 81

²⁹⁷ Abschnitt 2.3

²⁹⁸ Beschreibung siehe 5.1, S.76ff

5.2.6 Wofür das System benötigt wird

Die nachfolgend beschriebene Auffassung von Funktion konnte bei der Auswertung aller Projekte beobachtet werden, denn diese Auffassung dient dazu den Kontext zu beschreiben, in dem ein Gestaltungsproblem gelöst wird. Diese Auffassung wird meist textuell zu Beginn der Projekte festgehalten. Diese Beschreibung hält fest, wofür das System entwickelt wird. Das folgende Beispiel aus DA7 erläutert diese Auffassung.

Die Aufgabe des Diplomanden aus DA7 besteht in erster Linie darin, *ein System zu entwickeln, das die Auswirkungen eines Kickbacks bei Kettensägen auf den Anwender verhindert* (Abbildung 32). Dies wird vom Diplomanden als Ziel für die Entwicklung und auch als Funktion des Systems aufgefasst.

Wozu wird eine KB benötigt?

- Kontakt des Rückschlagbereiches mit feststehen Objekt -> Kickback
- Kettensäge wird in Sekundenbruchteilen mit großer Gewalt zurückgeschleudert -> Verletzungsgefahr Anwender
- Kettenbremse als Sicherheitseinrichtung -> bremst Kette in 100ms



Abbildung 32: Verdeutlichung des Sinnes einer Kettenbremse KB (aus DA7)

Die Kette soll innerhalb von 100 ms gebremst werden, um die gerade angesprochene Funktion *die Auswirkungen eines Kickbacks bei Kettensägen auf den Anwender verhindern* zu realisieren. In Abbildung 33 ist ein Teilsystem der Lösung gezeigt. Es wird eine Funktion im Sinne des gewünschten Verhaltens, *Kette soll gebremst werden* beschrieben, die mit der zweckbezogenen Funktion *Auswirkungen eines Kickbacks verhindern* korrespondiert. Es werden also zwei verschiedene Bedeutungen von Funktion verwendet, wobei beide Bedeutungen nützlich sind. Sie beschreiben das Produkt auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.

In jeder Entwicklungsaufgabe sollte der Kontext beschrieben werden, in dem die Produktentwicklung eingebettet ist. So wird mit der hier beobachteten Auffassung von Funktion eine weitere Bedeutung beschrieben, die in jedem Prozess des Lösen von Gestaltungsproblemen notwendig ist.

5.2.7 Funktionen für die Suche nach Lösungsprinzipien

In diesem Abschnitt sind diejenigen Beobachtungen der Auswertung der Projekte beschrieben, die Funktion bei der Suche nach Prinziplösungen²⁹⁹ beinhalten. Während in den voranstehenden Abschnitten Funktionen unterschiedlicher Auffassung immer auf Basis einer ähnlich konkreten Gestaltbeschreibung beschreiben sind, wird in diesem Abschnitt gezeigt, dass auch der Abstraktionsgrad der Gestalt variiert werden kann, um Lösungen zu finden.

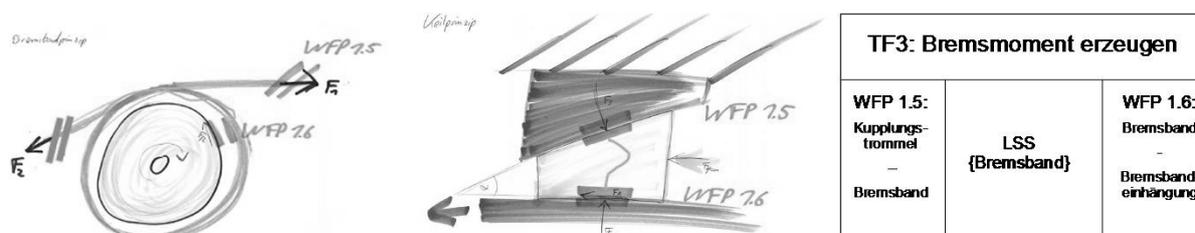


Abbildung 33: Erklärung des Funktionsprinzips (aus DA7)

Abbildung 33 zeigt zwei prinzipielle Lösungen für die Funktion *Bremsmoment erzeugen*. Durch die abstrakte Darstellung der Gestalt bleibt unklar, in welchem Kontext diese Lösungen erstellt wurden. Jedoch wird durch die Benennung der Orte der WF (Kupplungstrommel und Bremsband) Hinweise über die interagierenden Nachbarsysteme geliefert.

Vom C&C-Modell der bisherigen Kettenbremse ist hier nur ein Ausschnitt gezeigt (Abbildung 35). Es können jedoch bei der Lösungssuche mithilfe des vollständigen C&C-Modells Auswirkungen auf die anderen Teilsysteme abgeschätzt werden und in die Lösungsauswahl mit einfließen. Beispielsweise ist die Verwendung des Keilprinzips (Abbildung 33-Mitte) ungeeignet, da ein einfaches und schnelles Lösen der Bremse mit dem bestehenden Hebel nicht möglich wäre.

5.2.8 Funktion in der täglichen Sprache

In allen analysierten Projekten wird Funktion verwendet, um technische Sachverhalte zu klären. In der Dokumentation der Projekte wird die Funktion der Produkte mit Fließtext erklärt. Das Format der Beschreibung von Funktion in der alltäglichen Sprache ist nicht explizit festgelegt. Jedoch zeigt sich in allen Anwendungen, dass die Beschreibung von Funktion in einem Fließtext das wesentliche Werkzeug ist, um einem Beteiligten „den Zweck eines Systems nahe zu bringen“. Dieser Auffassung von Funktion liegen keine explizite Definition und kein Formalismus zugrunde, sodass die Beschreibungen höchst unterschiedlich sind. Eine Anweisung zur

²⁹⁹ Prinziplösungen beinhalten wenige Details zu Randbedingungen, siehe Abbildung 33.

Formulierung der Funktion ist höchstens im Schreib- oder Sprachstil zu finden. Jede Erklärung eines technischen Sachverhaltes, sei es eine Diplomarbeit, die Einführung in einen technischen Sachverhalt durch einen Vortragenden oder die Darstellungen des technischen Problems in einer wissenschaftlichen Publikation beginnt meist mit Sätzen oder Aussagen wie: *das hier gezeigte System ist eine Maschine xy, sie ist dazu da, um die Aufgabe yx zu erfüllen und somit dem Anwender einen Nutzen z zu verschaffen*. Wird die Erklärung weiter vertieft, trifft man immer wieder auf Aussagen wie *das nach dem Prinzip xy funktioniert*. Die Schlussfolgerung hieraus wird in Abschnitt 7.1.4 gezogen, wo erklärt wird, dass formale Konventionen der Formulierung von Funktion dem Anwender wichtige und notwendige Beschreibungsmittel rauben.

5.3 Einfluss der Vorgehensweise auf die Verwendung von Funktion

In diesem Abschnitt werden diejenigen Ergebnisse beschrieben, die einen Einfluss der Vorgehensweise der Projektbearbeiter auf die Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion aufweisen. Diese Ergebnisse werden aus den unterschiedlichen Projekten als Muster herausgearbeitet, so dass die Ursachen für erfolgreiche oder weniger erfolgreiche Vorgehensweisen ergründet werden. Für die Beantwortung der Forschungsfragen, die der Forschungshypothese 2 aus Abschnitt 3.2 zugeordnet werden, werden hier Argumente gesammelt. Gründe für die Bedeutsamkeit der Analyse der Vorgehensweise bei der Einführung von Funktionen im C&C-Ansatz zum Lösen von Gestaltungsproblemen sind:

1. Eine sorgfältige Analyse des Problems und eine Konzentration auf die funktionsbestimmenden Elemente sind Merkmal erfolgreicher Vorgehensweisen³⁰⁰. D. h. die Funktionen, und daran angeknüpft die Probleme, sollten klar herausgearbeitet werden. Der Begriff Funktion ist für den C&C-Ansatz so zu gestalten, dass dies für alle Anwendungsszenarien nützlich ist.
2. Für den ersten Kontakt der Anwender mit dem C&C-Ansatz sollten klare Unterscheidungen getroffen werden können, damit der Lernende möglichst schnell einen den Aufwand rechtfertigenden Nutzen sieht.

5.3.1 Ziel der Problemlösung

Wofür ein Modell aufgebaut wird, bestimmt maßgeblich die Vorgehensweise. Dieses Ziel oder der Zweck des Modellaufbaus sind beispielsweise der *Aufbau von Know-how*, *schnelles Lösen eines Problems*, *Bestimmung/Erklärung des Problems*, *gut begründete Lösungspräsentation* oder die *Strukturierung der Vorgehensweise*.

Vor allem in Schulungen, wenn mehrere Personen gemeinsam an einem Gestaltungsproblem arbeiten, scheint die explizite Beschreibung des Ziels ein wichtiger Faktor für den weiteren Verlauf der Analyse zu sein. Obwohl dies vielen Teilnehmern zu Beginn trivial erscheint, zeigt sich, dass die Schulungsteilnehmer ein zum Teil erheblich unterschiedliches Verständnis der gegebenen Aufgabenstellung haben. Mit dieser Beschreibung des Zwecks der Modellbildung kann einem auftretenden Konflikt vorgebeugt werden. Teams, die diesen Schritt zu Beginn nicht explizit durchführten, mussten dies zu einem späteren Zeitpunkt nachholen, um dann erst das gemeinsame Verständnis für die Problematik herzustellen. Je nachdem, wie unterschiedlich die Auffassung vom Problem ist und wie diese Unterschiede das

³⁰⁰ Stand der Forschung, Abschnitt 2.2.4

bisherige Ergebnis beeinflusst haben, ist die Überarbeitung notwendig oder das bisherige Ergebnis muss verworfen werden.

5.3.2 Durchgängige Verwendung des C&C-Ansatz in Analyse und Synthese

Abbildung 34 zeigt die grafische Darstellung der Reflexion einer C&C-Anwendung für das Lösen des Gestaltungsproblems in DA4. Nachdem das System³⁰¹ mit dem C&C-Ansatz analysiert und der Diplomand das Problem eingegrenzt hatte, suchte er Lösungen. Hierbei vernachlässigte der Diplomand bei der Ideensuche das erstellte Analysemodell und bewertete die gefundenen Ideen nicht auf Basis des erstellten Modells. Bei der Gestaltung traten so unerwartete Probleme auf, die eine Integration der neuen Lösung in den bestehenden Teil der Maschine verhinderten.

Der Modellaufbau sollte kontinuierlich in Analyse- und Syntheseschritten erfolgen und nicht unterbrochen werden. Die Lösungssuche verläuft wesentlich sicherer, wenn sie auf Basis des Analysemodells durchgeführt wird. Die scheinbar *creative Lösungssuche* ohne einschränkende Randbedingungen führt bei der Integration in die bestehenden Teilsysteme zu Problemen. Für die Lösungssuche an sich wird in der Konstruktionsmethodik Unterstützung³⁰² bereitgestellt. Die Integration und Kombination der neuen Lösung mit den bestehenden Teilen des Systems wird jedoch der Expertise des Produktentwicklers überlassen. Je nach Expertise und Erfahrung im eventuell neuen Fachgebiet, werden Lösungen ausgewählt, deren Auswirkungen auf den bestehenden Teil des Systems schwer abzuschätzen sind.

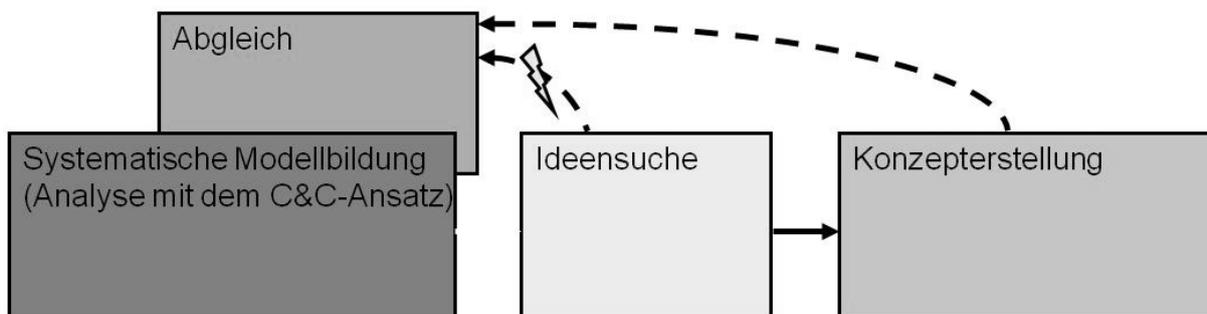


Abbildung 34: Ergebnis der Evaluation eines Probanden (aus DA4)³⁰³

Während dies in DA4³⁰⁴ nicht gelungen ist, zeigt Abbildung 35 das Beispiel der DA7³⁰⁵. Funktionen werden mit dem C&C-Ansatz über entsprechende WFP und LSS in Bezug zu einander gesetzt.

³⁰¹ Anleger einer Bogenoffsetdruckmaschine, siehe Abschnitt 5.1.2

³⁰² Siehe Abschnitt 2.1

³⁰³ Der Diplomand unterteilte die Gestaltung in Ideensuche und Konzepterstellung, wobei das Ziel der Arbeit auch die detaillierte, fertigungsgerechte Ausarbeitung der Gestalt war, siehe Abschnitt 5.1.2.

Die schwarz umrandeten Funktionen stellen die erwarteten Funktionen des Systems dar. Diese Funktionen wurden aus der Analyse einer bestehenden Kettenbremse ermittelt. Die Zusammenhänge der Funktionen sind durch die Zuordnung der WFP und LSS auf der Gestalt ermittelt. Jedes WFP trägt zu mindestens zwei Funktionen bei.

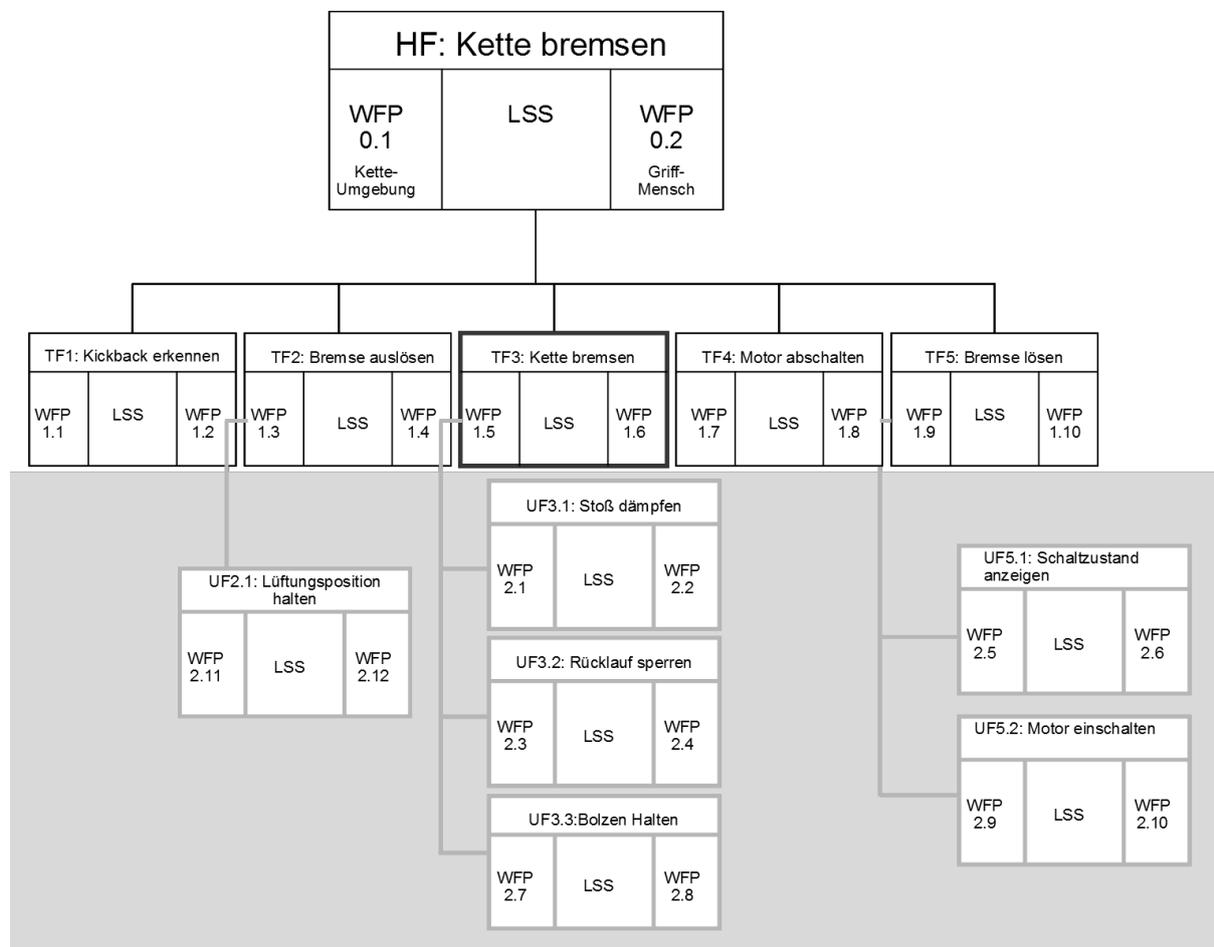


Abbildung 35: Durchgängige C&C-M Anwendung (aus DA7)

Das Problem³⁰⁶ wurde in der Teilfunktion 3 (TF3) lokalisiert. Dort ist folglich auch der Ansatzpunkt für die Lösungssuche (fette Umrandung). Um neue Lösungen für diese Funktion zu finden, wurde eine Vielzahl an Lösungen generiert und mithilfe des Analysemodells bewertet. Diese Bewertung beinhaltet die Konsequenzen, die für die benachbarten Systeme aus der neuen Lösung entstehen. Die grau hinterlegten Funktionen ergeben sich aus der Auswahl des neuen Lösungskonzeptes. Wenn die

³⁰⁴ Ziel der Arbeit war es eine Lösung für das seitliche Ausrichten von Papierbögen in Bogen-Offsetdruckmaschinen zu finden

³⁰⁵ Ziel der Arbeit war es eine Lösung für das Bremsen der Kette bei Elektrosägen zu finden

³⁰⁶ die bisherige Lösung für die Erzeugung des Bremsmomentes ist unter den neuen Randbedingungen einer elektrischen Säge zu schwer und überdimensioniert

Kette mit einem plötzlich einrückenden Bolzen (TF3) *blockiert werden* soll, dann muss der *Stoß gedämpft werden* (UF3.1), der *Rücklauf gesperrt werden* (UF3.2) und der *Bolzen gehalten werden* (UF3.3). Durch die Zusammenhänge kann dann entschieden werden, welche Lösung am besten zu den bestehenden Teilsystemen passt.

5.3.3 Tiefe der Analyse und wann beginnt die Lösungssuche

Bei der Auswertung der Projekte zeigt sich ein Kernproblem: Es konnte nie pauschale methodische Unterstützung für den richtigen Detaillierungsgrad der Analyse gegeben werden. In allen Schulungen, Diplomarbeiten, Entwicklungsprojekten und Forschungsworkshops wurde die Frage „Wie weit oder wie tief muss man analysieren?“ gestellt und blieb unbeantwortet.

Einerseits besteht die Gefahr, dass zu intensiv nach dem Problem gesucht wird, dass versucht wird, eine vollständige Erklärung für das Problem zu finden. Da jedoch ein Problem nie vollständig bestimmbar ist und sich auch mit der Lösungssuche entwickelt³⁰⁷, führt die ausschließliche Problemanalyse zu einem hohen Aufwand. So wird das Aufzeigen möglicher Lösungen versäumt und ein Großteil der Zeit für die Analyse verwendet werden.

Andererseits besteht die Gefahr, dass zu wenig nach dem Problem gesucht wird, dass Lösungen gefunden werden, die nur scheinbar mit dem Problem zu tun haben und somit dieses nicht lösen.

5.3.4 Analyse und Ideengenerierung

Bei der Analyse zur Vorbereitung der Synthese kommt es in vielen Fällen vor, dass Lösungsideen im Kontext der Analyse entstehen. Ideen entstehen scheinbar immer dann, wenn Projektbearbeiter sich intensiv mit den Details eines Sachverhalts auseinandersetzen.

Die Schwierigkeit besteht darin, die Idee aufzunehmen, zuzuordnen und dann wieder zur Analyse zurückzukehren³⁰⁸, ohne dass die zuvor gewählte Systematik abgebrochen wird. Dies geschieht, wenn Probanden sich auf diese gerade gefundene Idee fixieren, ohne den Lösungsraum weiter zu erkunden.

Während dieses Vorgehen in den Schulungen durch die Moderatoren gesteuert werden kann, ließen sich Einzelanwender schneller vorfixieren. D. h., sie fokussieren

³⁰⁷ Abschnitt 2.2

³⁰⁸ Die wird beispielsweise von ALBERS in der SPALTEN Methode mit dem Kontinuierlichen Ideen Speicher KIS vorgeschlagen, (Albers, et al., 2005)

die Suche nach Lösungen auf einen gerade betrachteten Gegenstand und beziehen weitere, noch nicht betrachtete Teilsysteme nicht in die Lösungssuche mit ein.

5.3.5 Übersicht behalten und Detailanalyse

Viele C&C-Modelle werden nicht systematisch erstellt. Dies führt schnell zur Unübersichtlichkeit der Analyse. Hierbei werden im ersten Schritt alle offensichtlichen und sichtbaren WFP und LSS gesucht und beschrieben. Erst nach dieser unstrukturierten und Komponenten-orientierten Sammlung von WFP und LSS wurde beispielsweise von vielen Schulungsteilnehmern versucht, Funktionen für die einzelnen Sets an WFP und LSS zu benennen und diese in eine geordnete Struktur zu bringen. Abbildung 36 zeigt ein C&C-Modell des Betonankers aus einer zeitweise nicht moderierten Gruppe. Das Modell wird schnell unübersichtlich und es ist im Nachhinein auch schwer möglich, eine Struktur für die Funktionen herzustellen. Das Modell wurde nicht schrittweise aufgebaut, sondern wurde auf einmal oder auf Basis der einzelnen Zeichnung erstellt.

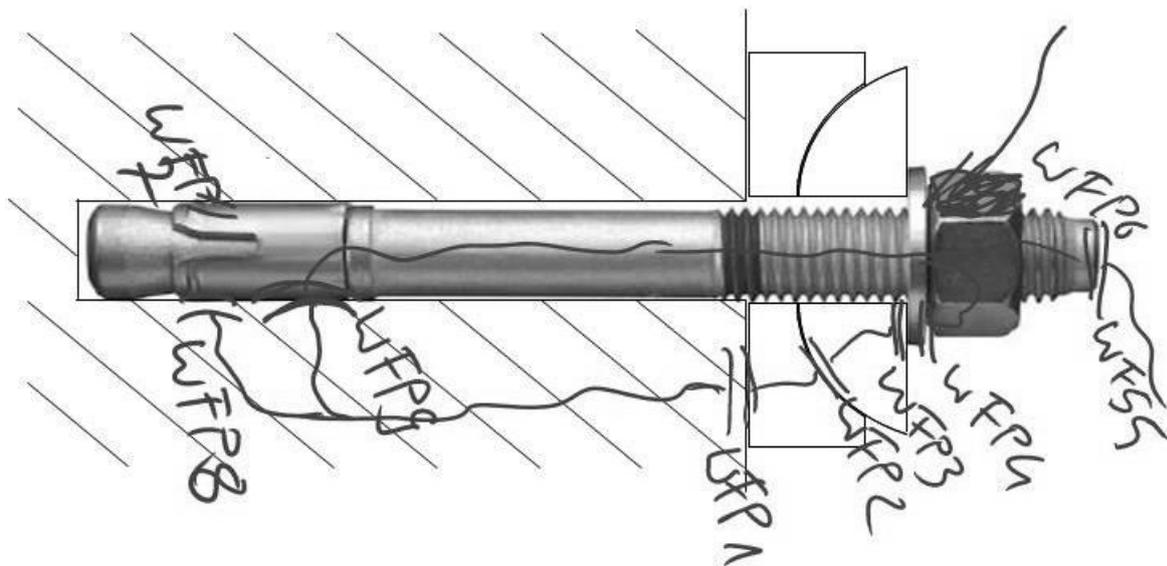


Abbildung 36: Im ersten Schritt so viele WFP und LSS wie möglich (aufbereitet aus S3)

Abbildung 31 zeigt ein Modell des gleichen Betonankers, jedoch wurde dieses schrittweise, top-down aufgebaut, um von vorneherein die Struktur herzustellen und beizubehalten.

In den Schulungen und Projekten zeigte sich so, dass es sinnvoll ist, im Anschluss an die Benennung der Hauptfunktion nach Aktionen³⁰⁹ zu fragen. Aktionen wurden

³⁰⁹Aktionen sind Funktionen, die der Anwender oder das Nachbarsystem mit dem betrachteten System ausführen, bspw. „Betonanker anziehen“ als Aktion, die der Anwender mit dem Betonanker erfüllt, siehe Abschnitt 2.3.4, S. 29

erfragt, indem die Projektbearbeiter vom Autor dieser Arbeit dazu aufgefordert wurden Situationen zu antizipieren, die vor oder nach dem Betriebszustand eintreten³¹⁰. Jedoch haben diese Situationen Auswirkungen auf den Betrieb und damit die Ursache für das zu lösende Problem sein können. So wird das Problem auch zeitlich betrachtet. Anschließend kann für jede der Aktionen ein separates C&C-M erstellt werden. Es kann eine Reihenfolge festgelegt werden, in der das System im weiteren Fortgang vertieft betrachtet werden soll.

Um diese Übersicht zu erhalten wurde vorgeschlagen, die betrachtete Funktion in drei bis fünf Teilfunktionen aufzuteilen. Werden mehr als fünf Funktionen als unmittelbar relevant betrachtet, ist dies ein Hinweis darauf, dass an einer Stelle eine weitere Fokussierung notwendig ist.

³¹⁰ Im Falle des Betonankers bspw. das „Bohren des Loches“, das, wenn es schräg gebohrt ist oder der Bohrer verschlissen ist Auswirkung auf den optimalen Sitz des Betonanker haben kann.

5.4 Funktion und Gestalt zuordnen mit dem C&C-Ansatz

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Auswertung beschrieben, die zeigen, wie Funktion und Gestalt mit dem C&C-Ansatz zugeordnet wurden.

5.4.1 Darstellung der Funktion ohne Bezug zu WFP und LSS

Mit dem C&C-Ansatz können Funktion und Gestalt verbunden³¹¹ werden. Ein in den Projekten häufig beobachtetes Phänomen ist, dass die Funktion nicht eindeutig zugewiesen wird oder implizit bleibt. Abbildung 37 zeigt, das C&C-Modell eines Dieselinjektors, dessen Funktion nicht explizit beschrieben wird. Die Funktion wird im begleitenden Text der DA beschrieben, jedoch wird keine eindeutige Beziehung zur Gestalt hergestellt.

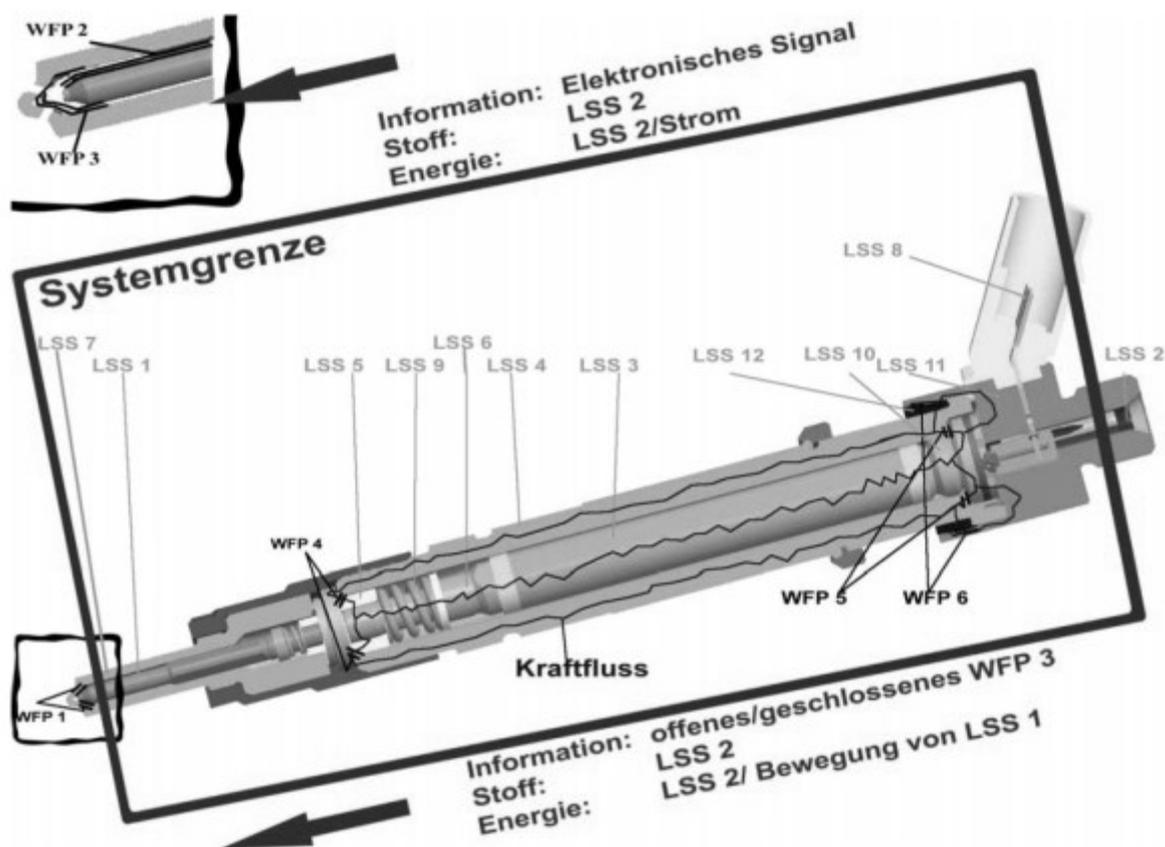


Abbildung 37: C&C-Modell eines Dieselinjektors ohne Beschreibung der Funktion (DA9)

Die Funktion bleibt somit mehrdeutig. Die WFP und LSS werden auf der Gestalt lokalisiert, jedoch werden diese dann nur qualitativ den Funktionen zugewiesen. Hierbei werden auf der Gestalt die für die Funktion entscheidenden Stellen herausgestellt, indem WFP und LSS beschrieben werden. Dies ist für viele

³¹¹ (Albers, et al., 1999), (Matthiesen, 2002), (Albers, et al., 2003b)

Probanden bereits enorm hilfreich, um sich das Verständnis für das System anzueignen und dieses auch zu kommunizieren. Jedoch ist dies noch nicht ausreichend, um eine gesamte Struktur von vielen Funktionen und deren Beziehungen darzustellen.

5.4.2 Vernachlässigung der LSS

Abbildung 26 auf Seite 86 zeigt ein C&C-Modell, bei dem die LSS nicht beschrieben wird. Die Funktion wird mindestens zwei WFP zugewiesen, jedoch wird an keiner Stelle die LSS aufgeschrieben, dargestellt oder zugewiesen. Dieses Phänomen tritt auf:

- wenn die Funktion einem einzelnen WFP zugewiesen wird,
- wenn die Funktion durch Input/Output formuliert wird, der Fokus auf der Suche nach den Flussgrößen liegt und somit der Fokus auf der Interaktion der Teilsysteme liegt,
- wenn voreingenommen auf *das eine relevante* WFP fokussiert wird, ohne eine Funktion zu formulieren.

In allen drei Fällen setzen die Projektbearbeiter die Grundhypothese nicht konsequent um und berauben sich so der Chance eine Struktur aufzubauen. Die LSS wird immer dann vernachlässigt, wenn eine schnelle voreingenommene Vereinfachung des C&C-Modells vorgenommen wird. Diese Vereinfachung ist dann entweder nicht gestaltbezogen oder es findet keine „Systembetrachtung“ statt, sondern eine direkte Fokussierung auf eine Stelle des Systems.

5.4.3 Einzelne WFP und die Verbindung zum zweiten WFP

Oft werden Funktionen einzelnen WFP zugewiesen. Dies tritt häufig auf, wenn die Funktion mit einem Wort formuliert oder eine Ausnahme gemacht wird, weil das zweite WFP nicht gefunden wird. In einigen Fällen wird das Finden des zweiten WFP erschwert, weil andere Modelle Vereinfachungen beinhalten, die dann auch auf den C&C-Ansatz übertragen werden. Diese Fehler in der Anwendung des Modells konnten in den Projekten in drei Bereichen beobachtet werden.

5.4.3.1 Funktion in einem Wort

In vielen Fällen geht die Formulierung der Funktionen in einem einzelnen Wort³¹² mit der Zuweisung der Funktion zu einem einzelnen WFP einher. Dies dient der Beschreibung der Effekte in einem WFP und wird trotzdem als Funktion bezeichnet.

³¹² Siehe Abschnitt 5.2.4

Oftmals wird hierfür ein einzelnes Substantiv oder eine substantiviertes Verb verwendet³¹³.

5.4.3.2 Flucht der Projektbearbeiter in Ausnahmen von Grundhypothesen

Ein weiterer Grund für die Zuweisung eines einzelnen WFP zur Funktion ist die Unfähigkeit das zweite WFP aufzufinden und die Flucht in eine Ausnahmeregelung. Anstatt die Ursache bei der eigenen Vorgehensweise zu suchen, wird von den Projektarbeitern eine Ausnahmeregelung für die Situation erstellt. Das in DA1 bearbeitete Problem der Funktion *Klemmen*³¹⁴ kann als solche Ausnahme interpretiert werden. Der Diplomand fasste einen Effekt als Funktion auf und veränderte so für sich die Grundhypothese 2. Der Fehler lag darin, dass er zunächst nicht in der Lage war, die Zusammenhänge darzustellen, die letztendlich für den von ihm fokussierten Bereich von Bedeutung waren. Erst später im Projekt erkannte er, dass bspw. das Springen der Kupplung im Schraubendreher Auswirkungen auf das *Klemmen* im WFP zwischen Bit und Recess hat.

5.4.3.3 Andere Modelle, WFP an einem anderen Ort

Abbildung 38 zeigt die Gestalt des Fliehkraftauslösers für die Kettenbremse aus DA7³¹⁵. Die Funktion dieses Systems ist *bei einer bestimmten Beschleunigung in eine bestimmte Richtung einen mechanischen Impuls an das Nachbarsystem abzugeben*. Die linke Darstellung beinhaltet ein WFP1.1 zwischen Fliehkraftauslöser und Trägheitskraft. Jedoch gibt dort keine Interaktion.

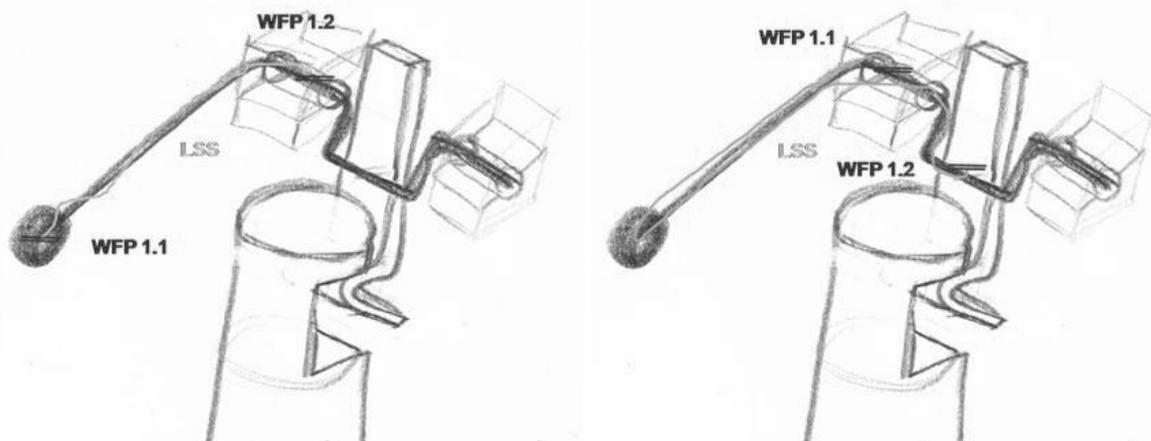


Abbildung 38: Das zweite WFP für die Funktion eines Fliehkraftauslösers (aus DA7)

Das System interagiert dort nicht mit den benachbarten Systemen, die Zuordnung des WFP ist somit nicht korrekt. Stattdessen ist die Betrachtung der Fliehkraft als

³¹³ Siehe Abschnitt 5.2.4

³¹⁴ Siehe Abschnitt 5.2.4

³¹⁵ Entwicklung einer Kettenbremse für Elektrosägen, siehe Abschnitt 5.1.2

Die Auswertung der Projekte zeigt, dass die Funktion eines Systems oft mit Bezug auf sich selbst formuliert wird.

Geht man davon aus, dass ein System eine Funktion erfüllt und dass diese Funktion immer in Wechselwirkung mit benachbarten Systemen erfüllt werden muss, wirkt ein System stets auch auf seine Umwelt. Logische Fehler in der Formulierung der Funktion treten auf, wenn die Funktion so formuliert ist, als ob das System sich selbst manipuliert. Beispielsweise zeigt Abbildung 40 die Funktion *Kolben führen*, die vom Kolben ausgeführt wird. Ein Kolben kann sich aber nicht selbst führen. Er muss von einem Nachbarsystem geführt werden.

5.4.4.1 Falsche Zuweisung der LSS

Bei der Zuweisung der Funktion zur Gestalt mit WFP und LSS ist die Zuweisung der LSS falsch, wenn ausschließlich der Name des Bauteils in der Beschreibung der LSS wiederzufinden ist. Abbildung 40 zeigt, dass das C&C-M formal richtig aufgebaut ist, dass jedoch die LSS für die Funktion im Kolben selbst liegt.

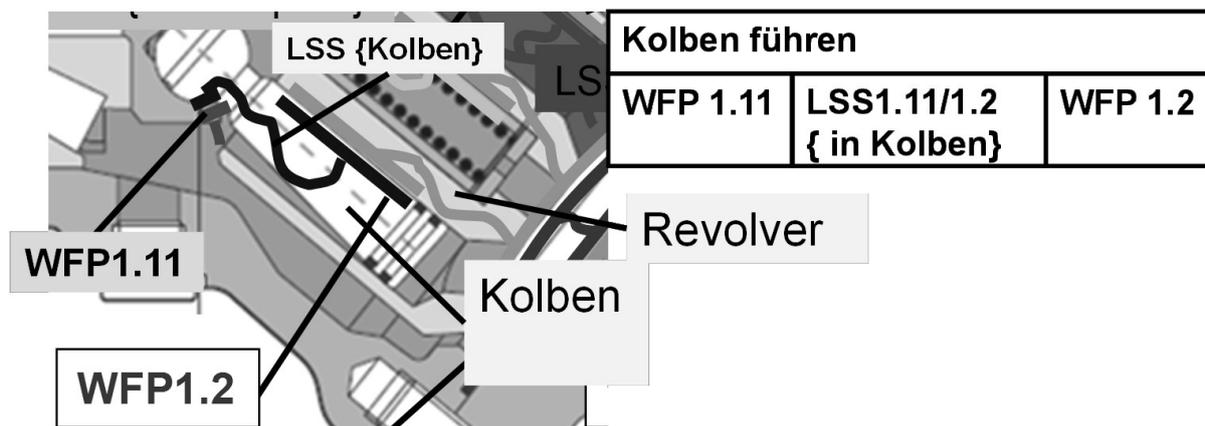


Abbildung 40: Logischer Fehler bei der Zuweisung von Funktion und Gestalt

Der Kolben kann sich nicht selbst führen. Wenn Funktion Interaktion bedeutet, muss die Funktion *Kolben führen* durch ein benachbartes System erfüllt werden, damit muss die LSS in einem anderen, benachbartem Teilsystem liegen. In diesem Falle wird die Funktion *Kolben führen* durch den Revolver erfüllt. Dieser Fehler tritt meist dann auf, wenn ein Teilsystem isoliert von den anderen Teilsystemen betrachtet wird.

5.4.4.2 Logikfehler bei der Formulierung: Die Funktion wird nicht vom System erfüllt

Bei der Benennung von Funktionen kommt es vor, dass die Funktion in Analogie zu einem ähnlichen, bekannten System formuliert wird. In dem folgenden Beispiel aus einem der Forschungsworkshop³¹⁷ wurde nach der Funktion *Welle mit Nabe verbinden* gesucht, da sich die Teilnehmer sicher waren, dass diese Funktion von

³¹⁷ Abschnitt 5.1.5, Seite 84

5.4.4.3 Logikfehler bei der Formulierung: geschlossenes System

Es konnte beobachtet werden, dass Projektbearbeiter für eine Funktion WFP und LSS zu suchen und so ein geschlossenes System beschreiben. Formuliert der Projektbearbeiter die Funktion wie oben mit *Welle mit Nabe verbinden* und versucht ein zweites WFP und die verbindende LSS zum WFP1.1 zu finden, indem er das eine gefundene WFP1.1 in zwei miteinander verbundene WFP1.1 und WFP1.2 aufgespalten, entsteht dieses geschlossene System. Abbildung 42 zeigt dies für den zylindrischen Pressverband. Formal ist das C&C-M richtig aufgebaut und entspricht der zweiten Grundhypothese. Die Funktion *Welle mit Nabe verbinden* wird zwei Mal, von der Nabe und von der Welle erfüllt³¹⁹.

Es wird hier jedoch ein System beschrieben, das nicht mit seiner Umgebung wechselwirkt und somit keine Funktion erfüllt.

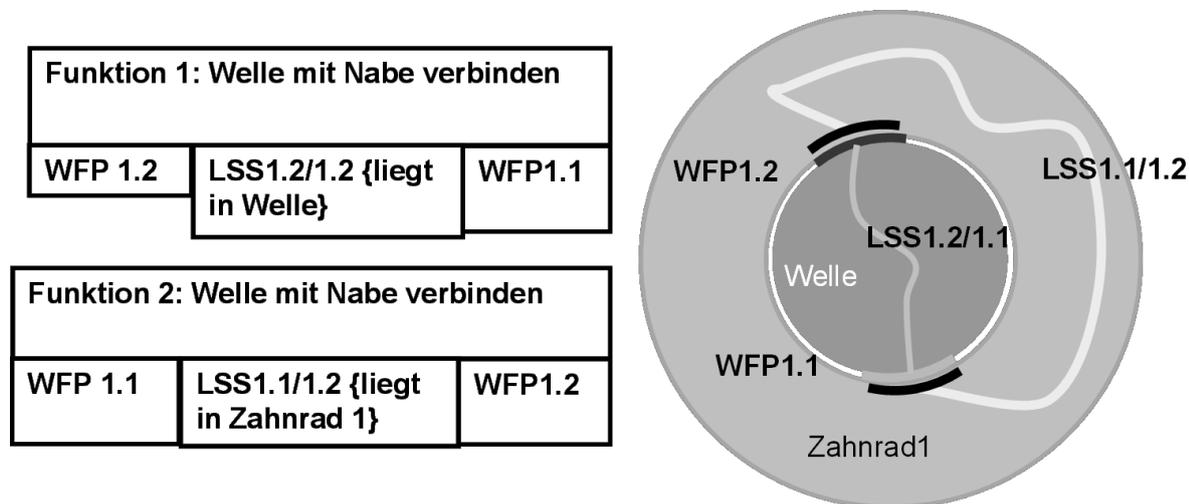


Abbildung 42: ZPV und Betonanker mit geschlossenem System

Erst durch die Anbindung an die Umgebung kann dieses System in ein übergeordnetes System³²⁰ eingeordnet werden und Funktion erfüllen. Im dargestellten Zustand wird keine Funktion erfüllt. Im Beispiel ist die Funktion so formuliert, dass keinerlei Hinweis auf Wirkung des Systems auf seine Umgebung gegeben wird, d. h., es wird kein Hinweis gegeben, warum man die Welle mit der Nabe verbinden sollte.

5.4.5 Mehrdeutigkeit der Funktion

Bei der Analyse eines technischen Systems können dessen Funktionen immer unterschiedlich großen Teilsystemen zugewiesen werden. Die Auswertung der

³¹⁹ Auf diese Weise ergibt sich auch wieder der erste Logikfehler aus Abschnitt 5.4.4.1.

³²⁰ Siehe Abschnitt 2.1.2, Seite 10 und (Ropohl, 2009)

Projekte zeigt, dass die Zuordnung der Funktionen zu den Teilsystemen niemals eindeutig ist.

Bei Einzelarbeiten, beispielsweise die Diplomarbeiten in Abschnitt 5.1.2, zeigt sich dieses Problem fast nie. Die Zuweisung wird von einer einzelnen Person durchgeführt, ist somit subjektiv aber für diese Person eindeutig. Bei Teamarbeiten, wie die Entwicklungsprojekte E1, E2 oder Schulungen S1 - S6, Abschnitt 5.1.3 und 5.1.4, tritt jedoch die Mehrdeutigkeit von Funktionen zutage. So können Funktionen nicht eindeutig zugewiesen werden, schon gar nicht, wenn diese abstrakt formuliert werden. Einer der ersten Schritte in den Schulungen war die Bestimmung der Hauptfunktion und der damit verbundenen Lokalisierung der WFP und LSS, sodass der Betrachtungsraum für den weiteren Fortgang vorab eingegrenzt wurde. Abbildung 43 zeigt zwei verschiedene Betrachtungsräume für die gleiche Funktion am Beispiel des Betonankers.

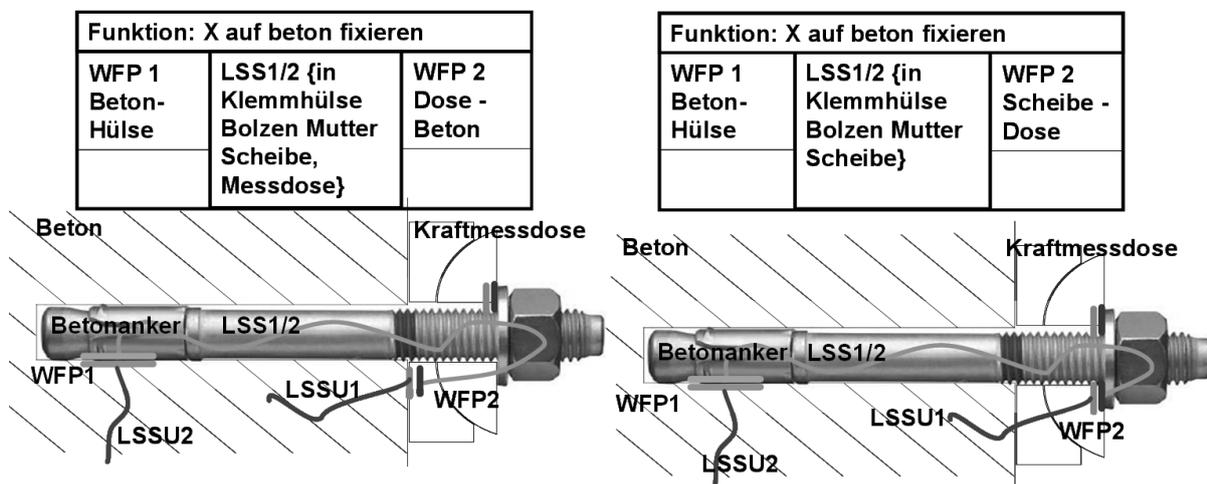


Abbildung 43: Unterschiedlicher Betrachtungsraum für dieselbe Funktion

Im einen Falle links ist die Messdose mit in das System einbezogen, im Falle rechts ist das zweite WFP *vor* der Messdose markiert. Somit liegt die Messdose außerhalb des Betrachtungsraumes. Die Funktion ist in beiden Beispielen mit gleichem Wortlaut formuliert.

Das am häufigsten von Projektbearbeitern genannte Argument ist, dass *die Funktion gar nicht erfüllt werden kann, wenn das Teilsystem der Messdose nicht vorhanden ist*. Durch die Frage nach der Funktion des Systems und unter Berücksichtigung des Grundsatzes, dass ein System seine Funktion nur in Wechselwirkung mit dem benachbarten System erfüllen kann, wird oftmals die Systemgrenze sehr weit gefasst. Ist diese Mehrdeutigkeit von Funktion unbekannt, führt das vor allem in Teamsitzungen zu ausschweifenden Diskussionen darüber „wo die Funktion stattfindet und wo nicht“. Die Funktion ist an dieser Stelle nichts objektives, sondern bildet einen Konsens für die Beschreibung des Systems. Wird den Teilnehmern vor

Augen geführt, dass mithilfe des C&C-Ansatzes genau dieses Problem behoben werden kann und dass dieser Vorgang durch die Zuweisung von WFP und LSS eindeutiger werden kann, wird der Ablauf beschleunigt. Im Allgemeinen tritt das beschriebene Problem vermehrt dann auf, wenn die Beteiligten der festen Meinung sind, dass die Funktion etwas völlig Eindeutiges wäre. Die Beteiligten müssen sich dann zuerst darauf einigen, was sie betrachten wollen und was nicht. Verstärkt wird dieser Sachverhalt noch durch unterschiedlich abstrakt formulierte Funktionen. Dies wird im nächsten Abschnitt erläutert.

5.4.6 Unterschiedliche Abstraktionsgrade der Formulierungen

Tabelle 8 zeigt zwei mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad formulierte Versionen der Funktion, die der Hülse des Betonankers aus den Schulungen³²¹ zugewiesen wurde. Die konkrete Variante führt letztendlich sehr schnell zu einer Einigung der Probanden. Zuvor hatten die Teilnehmer der Schulung auf der Ebene der abstrakten, Version argumentiert und fanden über längere Zeit keinen Konsens für die Funktion der Hülse.

Konkrete Formulierung	Abstrakte Formulierung
Hülse im Beton festklemmen.	Axialkraft erzeugen und in Reibkraft umwandeln.

Tabelle 8: Unterschiedliche Abstraktionsgrade der Formulierung der Funktion

Werden die Funktionen stärker gestaltbezogen mit dem C&C-Ansatz formuliert, fällt es Probanden wesentlich leichter ein *gemeinsames* Modell aufzubauen. Dadurch, dass die Zuweisung von Funktion und Gestalt mittels WFP und LSS eine Einigung auf konkrete Orte *erzwingt*, wird die Konsensfindung stark gefördert.

5.5 Unspezifische Faktoren im C&C-Ansatz

C&C-Ansatz unspezifische Faktoren beschreiben bei der Anwendung auftretende Kritikpunkte und Auffälligkeiten, die jedoch von Anwendern immer wieder direkt auf C&C-M bezogen werden.

5.5.1 Vorbehalte gegenüber Methodenanwendung

Es gibt viele Vorbehalte potenzieller Methodenanwender gegenüber „Neuem von der Universität“. Offensichtlich wurden in der Vergangenheit viele Fehler bei der

³²¹ Abschnitt 5.1.3

Einführung von Entwicklungsmethoden gemacht, sodass eine gewisse Skepsis bei den Anwendern besteht. Diese galt und gilt es in der Zukunft wieder zu überwinden.

5.5.2 Anleitung der C&C-Ansatz Anwendung

Nach der Einführung waren einige Entwickler beeindruckt von der Wirksamkeit des C&C-Ansatzes. Es besteht jedoch ein großer Bedarf an Anleitung zur Erstellung von C&C-Modellen. Dies betrifft vor allem das systematische Herunterbrechen von Systemen in Teilsysteme, aber auch den Wechsel zwischen Analyse und Synthese. Während der Bearbeitung der Projekte wurden die Entwickler durch Forscher des IPEK methodisch begleitet, sind sie hingegen auf sich alleine gestellt, fällt es offenbar schwer, die Systematik aufrechtzuerhalten. Andererseits gibt es Anwender, die wenig Anleitung bevorzugen.

5.5.3 Abbruch der Methode aufgrund der Komplexität des Problems

Das Abbrechen der Systematik als Reaktion auf die Komplexität eines Problems wurde von VISSER³²² beschrieben. Das Erlernen von Methoden ist vor allem zu Beginn aufwendig. Dem wurde in den ersten Projekten in den Diplomarbeiten Rechnung getragen, indem sich die Probanden zunächst anhand akademischer Beispiele in die Methode einarbeiteten, bevor sie zur Bearbeitung des realen Gestaltungsproblems übergingen. Dies führte einerseits zu einem guten Lerneffekt, jedoch war die Motivation der Probanden hierfür gering, da in der Einarbeitungszeit keine greifbaren Fortschritte in der Bearbeitung des realen Problems gemacht werden konnten. So wurde nach drei der neun Diplomarbeiten dazu übergegangen, die Arbeit direkt mit dem realen Problem zu beginnen, um den Diplomanden direkt den Nutzen der Methode zugänglich zu machen. Sie wollen ein Gestaltungsproblem lösen. Die Methode ist eigentlich nur Mittel zum Zweck. So verlief die Methodenanwendung in allen Projekten zu Beginn gut und die Projektbearbeiter konnten der Systematik folgen und diese auf ihr Problem unter Beratung durch den Autor dieser Arbeit anwenden. Sie taten dies solange diejenigen Aspekte im Modell festgehalten wurden, die ohnehin auf Basis ihres Grundlagenwissens bekannt waren. In den Schulungen war der Moderationsaufwand auf der Ebene der Hauptfunktion (Abbildung 24) gering, als die Probanden die Systematik erkannten. In jeder Schulung wurde die Analyse des Systems nach und nach vertieft, sodass die Probanden zwangsläufig auf unbekannte Funktionen und nicht direkt ersichtliche Vorgänge trafen. Vor allem in der Gruppe führten diese unbekannt Funktionen zu Diskussionen und Spekulationen, die zu einem Verlassen der vorgegebenen

³²² (Visser, 1996) und Abschnitt 2.2

Systematik führten. Hatten die Schulungsteilnehmer eine komplexe Funktion herausgearbeitet, wurde oftmals versucht, an dieser Stelle Lösungen zu suchen. Offenbar vermittelte die Bewältigung der Schwierigkeiten das Gefühl, dass bei diesem Teilsystem das Problem liegen muss. Der Moderator hatte in jedem Falle die Aufgabe, die Struktur der Vorgehensweise beizubehalten. So war es oftmals relativ leicht, den Schulungsteilnehmern aufzuzeigen, dass das gerade bearbeitete Problem nur eine Facette darstellt und dass es an anderer Stelle weitere, für die Streuung der Anzugskraft³²³ relevante Funktionen gibt. Auch in den Diplomarbeiten trat dieses Problem häufig auf. Da für die meisten Diplomanden die vorgeschlagene Vorgehensweise und die Anwendung des C&C-Ansatzes relativ neu war, erforderte die Anwendung der Methode einen ähnlich großen Aufwand wie die Analyse und das Lösen des Problems selbst. Zu Beginn des Prozesses wird der Aufwand oft noch akzeptiert, traten jedoch zu einem späteren Zeitpunkt größere Schwierigkeiten auf, wurde die gesamte Kapazität auf das Problem und nicht mehr auf die Anwendung der Methode gerichtet. Die Methode wird abgebrochen, wenn nicht vom Moderator die Einhaltung der Systematik gefordert wird. Dies wird als grundsätzliches Problem von Methoden angesehen und nicht auf den C&C-Ansatz bezogen. BIRKHOFER³²⁴ hat diese Faktoren der Einführung von Methoden bereits begründet.

³²³ Technisches Ziel der Schulung war die Erklärung der Steuerung der Auszugskraft und das Finden von Lösungen zu deren Überwindung, siehe Abschnitt 5.1.3.

³²⁴ Siehe Abschnitt 2.1.3

6 Verwendung von Funktionen im Experiment

Zunächst wird das Experiment beschrieben und die Auswertung erklärt. Anschließend sind die Ergebnisse entsprechend der Forschungsfragen in vier Unterkapitel aufgeteilt. Zunächst werden die unterschiedlichen Auffassungen von Funktionen aufgezeigt. Danach wird der Einfluss der Vorgehensweise auf die unterschiedlichen Auffassungen von Funktion beschrieben, worauf die Zuordnung von Funktion und Gestalt mit dem C&C-Ansatz näher beleuchtet wird. Abgeschlossen wird das Kapitel mit C&C-Ansatz unspezifischen Barrieren.

6.1 Beschreibung und Auswertungsschema

Ziel des Experimentes war es, das Funktionsverständnis für ein technisches System im Zusammenhang mit dem C&C-Ansatz unter gleich bleibenden Bedingungen zu untersuchen und so zur Beantwortung der in Abschnitt 3.1 angeführten Forschungsfragen zu gelangen. Des Weiteren wurden die Vorgehensweisen zum Aufbau von Systemverständnis untersucht. Die Probanden sollten hierzu die Funktionsweise eines Axialkolbenmotors beziehungsweise einer Axialkolbenpumpe (Abbildung 44) explizit aufschreiben und hierbei „laut denken“.

6.1.1 Beschreibung des technischen Systems

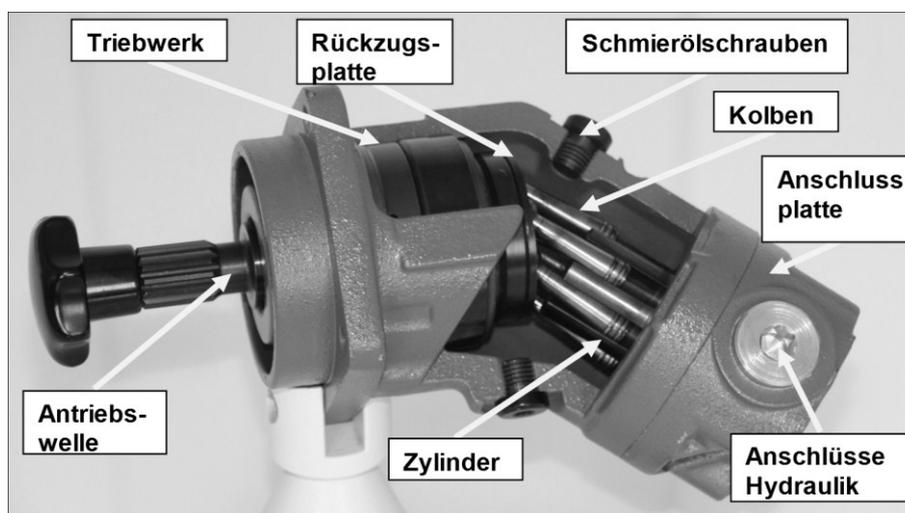


Abbildung 44: Physisches Modell der Pumpe

Das in Abbildung 44 gezeigte System ist eine ölhydraulische Maschine, die als Motor dazu dient, aus einem unter Druck stehenden Volumenstrom einer Hydraulikflüssigkeit eine Drehbewegung zu erzeugen. Das System kann aber auch als hydraulische Pumpe in geschlossenen hydraulischen Kreisläufen eingesetzt werden, wobei aus dem Antrieb ein mit Druck beaufschlagter Volumenstrom entsteht.

Für die Auswertung und Einordnung der Ergebnisse wird zunächst kurz ein Vergleichsmodell der Pumpe beschrieben³²⁵. Dieses Modell wird in den darauf folgenden Abschnitten herangezogen, um verschiedene Sachverhalte zu bewerten. Wie die einzelnen Datensätze wird das Vergleichsmodell hier nur auszugsweise in Abbildung 45 gezeigt. Das komplette Modell ist im Anhang der Arbeit zu finden.

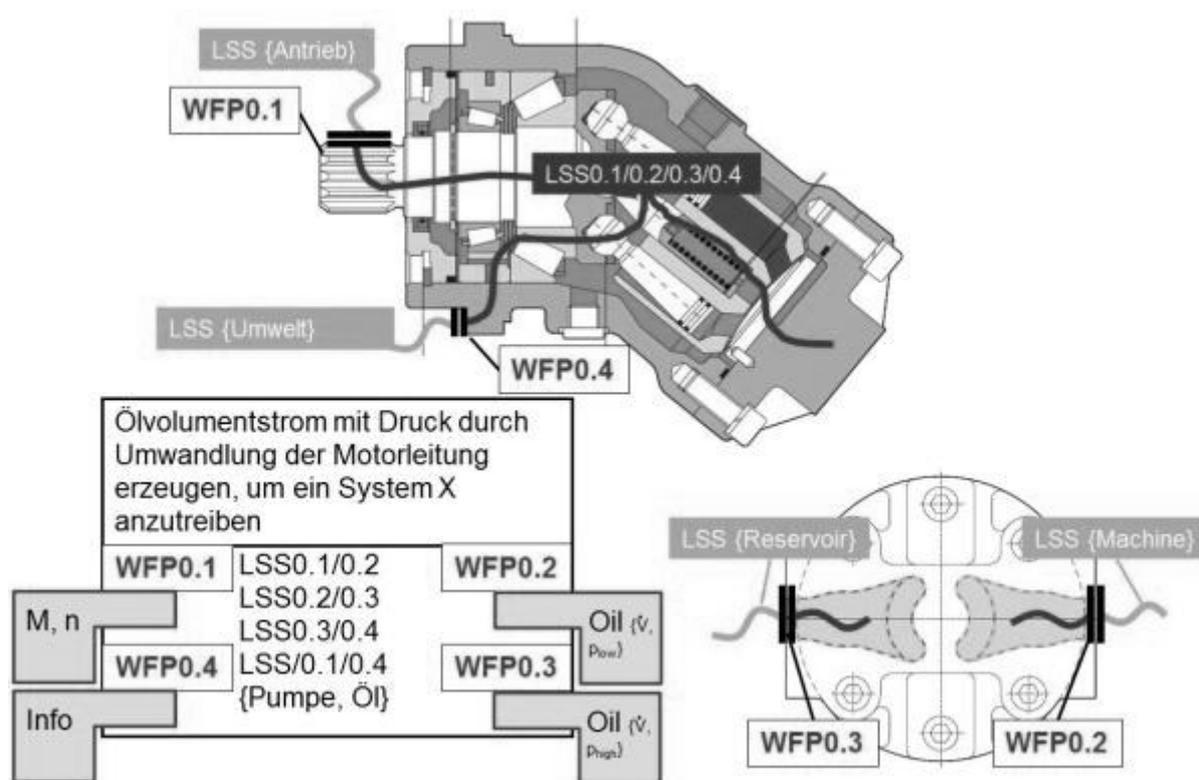


Abbildung 45: C&C-M für die Hauptfunktion der Pumpe

Abbildung 45 zeigt das C&C-Modell der Pumpe auf der Ebene der Hauptfunktion. Die Pumpe interagiert mit der Umgebung in vier verschiedenen WFP: an der Keilwelle mit dem antreibenden Motor (WFP0.1), dort wo die Pumpe an ihrem Nachbarsystem montiert ist (WFP0.4) und zwei WFP wo das Öl mit dem Antrieb oder dem Ölreservoir interagiert (WFP 0.2 und WFP 0.3). Das Öl ist also Teil des betrachteten Systems.

³²⁵ Dieses Vergleichsmodell wurde nach Abschluss der Experimente vom Autor dieser Arbeit und der Diplomandin Anne Ruckpaul ohne Zeitlimits und allen verfügbaren Informationsquellen erstellt. Im Gegensatz zum Experiment standen für die Erstellung des Vergleichsmodells sowohl Zeichnung, als auch das physische Modell zur Verfügung. Des Weiteren sind in der Wartungsanleitung der Pumpe sehr viele weitere Hinweise auf Details der Funktionsweise der Pumpe zu finden, so dass für den Aufbau des Vergleichsmodells neben mehr Zeit auch mehr Informationen für die Analyse zur Verfügung standen.

Die Hauptfunktion wurde in acht Teilfunktionen unterteilt, für die jeweils wieder weitere Teilfunktionen mit WFP und LSS auf der Gestalt abgebildet sind. Das Vergleichsmodell beinhaltet 47 Funktionen.

Nachfolgend wird zur Beschreibung der Ausdruck Pumpe verwendet, da das System den Probanden des Experimentes unter dieser Bezeichnung vorgestellt wurde. Die Pumpe wurde für das Experiment ausgewählt³²⁶, da deren Komplexität für die Analyse als nicht zu groß erschien, dennoch als herausfordernd eingestuft wurde.

6.1.2 Beschreibung des Experimentes

Die 18 männlichen und zwei weiblichen Probanden sind mit einer Ausnahme am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)³²⁷ ausgebildete Maschinenbauingenieure. Ein Proband wurde an der Universität Hannover ausgebildet, ebenfalls als Maschinenbauingenieur. 17 der 20 Probanden haben zum Zeitpunkt des Experimentes am KIT gearbeitet. zwei Probanden arbeiteten in Industrieunternehmen und ein weiterer Proband ist wissenschaftlicher Lehrer für Konstruktion an einer Berufsschule. Die Arbeitserfahrung variiert zwischen weniger als einem Jahr und 30 Jahren, wobei die meisten Probanden zwischen zwei und fünf Jahren Berufserfahrung haben. fünf Probanden hatten zum Zeitpunkt des Experimentes weniger als zwei Jahre am IPEK – Institut für Produktentwicklung gearbeitet und drei Probanden hatten mehr als fünf Jahre Berufserfahrung. zwei der Probanden mit mehr als fünf Jahren Berufserfahrung sind Hochschullehrer und haben alle anderen Probanden in Maschinenkonstruktionslehre und damit auch den C&C-Ansatz unterrichtet.

Alle Experimente wurden von DR. CLAUDIA ECKERT und dem Autor dieser Arbeit³²⁸ durchgeführt, wobei DR. ECKERT das Experiment mit dem Probanden leitete und der Autor dieser Arbeit im Wesentlichen stiller Beobachter war.

³²⁶ Die Entscheidung wurde von DR. CLAUDIA ECKERT und dem Autor dieser Arbeit gemeinsam getroffen

³²⁷ Ehemals Universität Karlsruhe (TH)

³²⁸ In den folgenden Abschnitten wird FRAU DR. ECKERT als Experimentator bezeichnet

Folgendes Experimentprotokoll wurde den Probanden vor Beginn vorgelegt:

Experimentprotokoll

Vielen Dank, dass Sie sich zur Teilnahme an unserem Experiment bereit erklärt haben.

Ziel des Experiments:

Das Ziel dieses Experiments ist es, möglichst im Detail zu verstehen, wie die vorliegende Axialkolbenpumpe funktioniert. Dieses Verständnis stellt die Basis für eine erfolgreiche Weiterentwicklung des Systems dar.

Um das Verständnis explizit darzustellen, sollen die Funktionen aufgeschrieben und geordnet werden. Hierdurch kann das Wissen um die Funktion des Systems weitergegeben werden.

Gehen Sie davon aus, dass Sie eine neue Anstellung bei einer Firma gefunden haben, die Hydraulikpumpen entwickelt. Ihre Aufgabe ist es sich schnell in das Themengebiet einzuarbeiten, um möglichst schnell und zuverlässig eine innovative Weiterentwicklung des Systems zu erreichen.

Wir werden verschiedenen Gruppen leicht unterschiedliche Anweisungen geben, um das oben beschriebene Ziel zu erreichen. Nach Abschluss des Experimentes werden die Unterschiede der Resultate und der Vorgehensweisen analysiert.

Ablauf des Experiments:

Bitte analysieren Sie die Funktionen einer Axialkolbenpumpe, die konstruiert wurde, um ein Hydrauliksystem mit Öldruck zu versorgen, indem Sie mithilfe des C&C-M die Funktionen des Systems bestimmen.

Bitte bedenken Sie, dass zu einem möglichst guten Systemverständnis auch die Nennung und die Auswirkungen von unerwünschten Funktionen auf die Gesamtfunktion von Bedeutung sind. Bitte geben Sie explizit Ihre Annahmen zum Anwendungskontext an.

Ergebnis

Um das Ergebnis zusammenzufassen, bitten wir Sie die identifizierten Funktionen in einem Funktionenbaum hierarchisch zu ordnen (welche Teilfunktionen tragen zu welcher übergeordneten Funktion bei?).

Die Probanden wurden von den Experimentatoren in zwei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe umfasste 11 Probanden und wurde gebeten das physische Modell (Abbildung 44) der Pumpe zu analysieren. Die zweite Gruppe mit 9 Probanden

wurde gebeten, eine zweidimensionale Wartungszeichnung des Systems zu analysieren (Abbildung 47). Diese Zeichnung war über die öffentlich zugängliche Website des herstellenden Unternehmens erhältlich. Das physische Modell war für die konstruktive Ausbildung aufbereitet, somit waren Teile des Gehäuses und des Zylinders entfernt worden, damit die beweglichen Teile sichtbar und zugänglich sind (Abbildung 46).

Die Probanden konnten die Pumpe mithilfe eines an der Keilwelle angebrachten Handrades betätigen und somit sehen, wie sich die Teile im Gehäuse bewegen. Den Probanden wurde jedoch kein Werkzeug zur Verfügung gestellt, um weitere Teile der Pumpe zu demontieren. Dies hatte zur Folge, dass nicht alle Bauteile des Systems sichtbar waren. Beispielsweise war nicht erkennbar, dass eine Steuerplatte zwischen Gehäuse und Anschlussplatte montiert ist. Diese Steuerplatte trennt die Druck- von der Saugseite. Das Triebwerk der Pumpe ist sehr kompakt gebaut und war ebenfalls nicht zu demontieren und damit nicht einsehbar. Der Mittelzapfen in der Mitte des Zylinders ist ebenfalls schlecht zu sehen und daher ist schwer zu erkennen, dass dieser den Zylinder abstützt und führt (Abbildung 46). Evident ist jedoch, dass die Rückzugsplatte mit der Antriebswelle verschraubt ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass alle Kolben an ihrer Stirnseite eine Bohrung aufweisen.

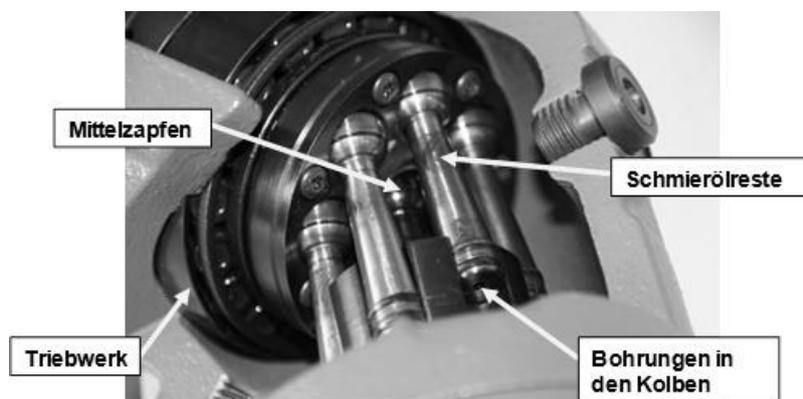


Abbildung 46: Kolben und Rückzugsplatte der Pumpe

In der Wartungszeichnung waren die unterschiedlichen Druckbereiche in Rot, blau und grün ausgewiesen, sodass diese sehr gut zu erkennen waren. Das Betriebsmedium ist in der Zeichnung grün markiert. In der Schnittdarstellung der Wartungszeichnung sind im Gegensatz zum physischen Modell auch die Steuerplatte und das Triebwerk vollständig sichtbar.

Da absehbar war, dass eine große Datenmenge erzeugt werden würde, wurde den Probanden ein Zeitlimit von einer Stunde vorgegeben. Dies ist für eine

aussagefähige Analyse ausreichend³²⁹. Die Probanden wurden gebeten, dem Experimentator während der Analyse ihre Vorgehensweise und Gedankengänge zu erläutern. Die Experimentatorin fragte die Probanden nach unterschiedlichen Sachverhalten, wenn diese ins Stocken gerieten, sodass während des Experimentes ein Dialog erzeugt wurde.

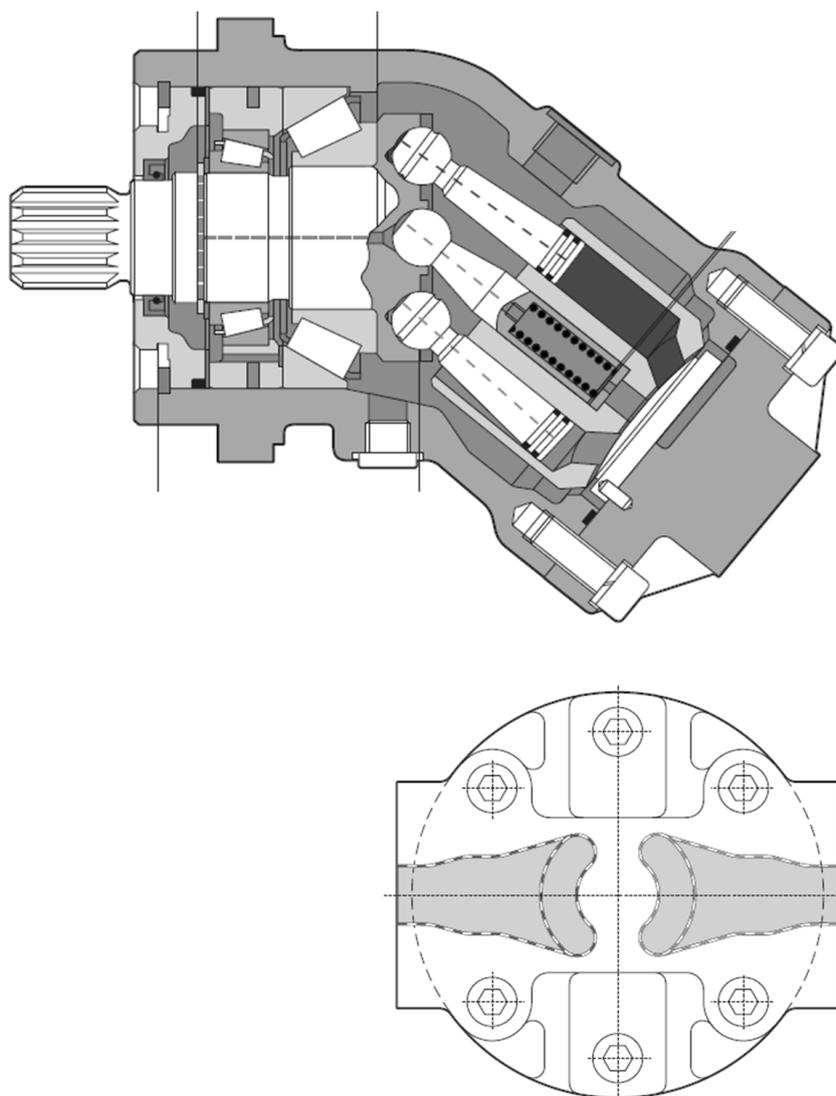


Abbildung 47: Wartungszeichnung des Systems mit hinzugefügten Bauteilbezeichnungen

6.1.3 Daten und Aufbereitung

Jedem Probanden³³⁰ wurde Papier in DIN A1 Format und Stifte unterschiedlicher Farben für Skizzen und Aufzeichnungen bereitgestellt. Alle Experimente wurden von

³²⁹ DR. ECKERT führte bereits viele empirische Studien durch, so dass dieser Erfahrungswert bestimmt werden konnte, bspw. (Eckert, et al., 2004)

³³⁰ Im Folgenden wird auf Grund der besseren Lesbarkeit in jedem Falle die maskuline Form in der Beschreibung der einzelnen Probanden verwendet.

zwei Positionen mit Videokameras aufgezeichnet. Zusätzlich wurde der Ton des Experimentes separat aufgezeichnet. Die Tonaufzeichnungen wurden durch wissenschaftliche Hilfskräfte Wort für Wort in eine Transkription übertragen. Die Datensätze wurden in der Reihenfolge der Transkriptionsarbeit durchnummeriert und geben keinen Aufschluss über die Reihenfolge der einzelnen Experimente.

Das Ergebnis des Experimentes von Proband Nr. 9 ist in Abbildung 48 dargestellt. Die Struktur der Funktionen ist nicht explizit erkennbar, da der Proband Teile der Pumpe zeichnete und jeweils die Funktion zuordnete und mit Worten beschrieb. Der nachträglich erstellte³³¹ Funktionenbaum ist in Abbildung 49 zu sehen.

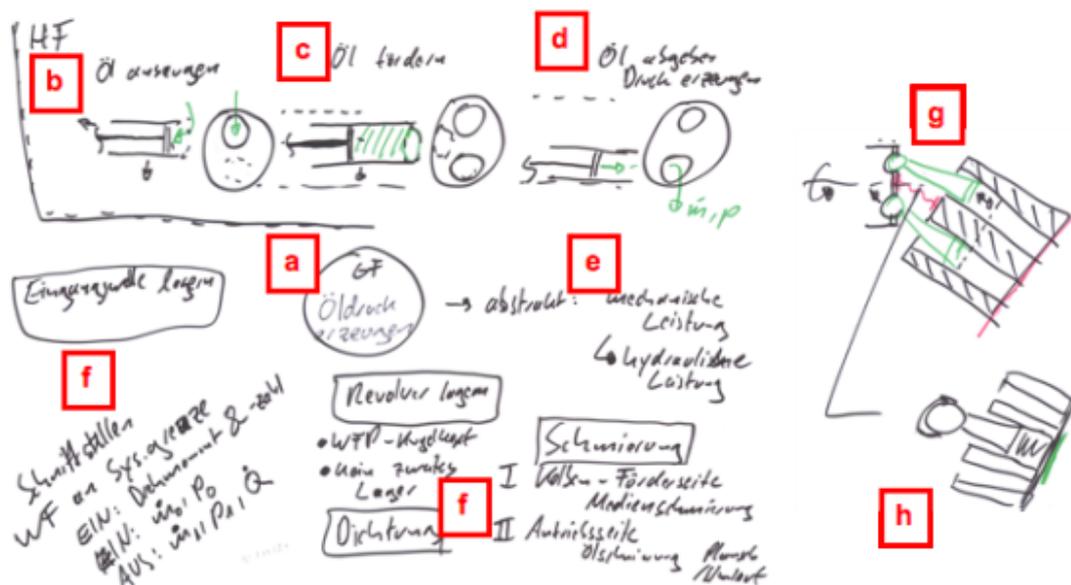


Abbildung 48: Ergebnis von Proband Nr. 9 ohne expliziten Funktionenbaum

Der Proband schrieb zuerst die Hauptfunktion der Pumpe (a) auf, bevor er erklärte, dass für die Erfüllung der Hauptfunktion drei Teilfunktionen: *Öl ansaugen* (b), *Öl fördern* (c) und *Öl abgeben/Druck erzeugen* (d) notwendig sind. Alle anderen Funktionen wurden von dem Probanden als uninteressant eingestuft und unterhalb einer Linie bei (a) eingezeichnet. Diese Funktionen wurden unstrukturiert aufgeschrieben (f). Für die Aufbereitung wurden solche Sammlungen von Funktionen im Funktionenbaum angeordnet. In diesem Falle wurden die Funktionen bei (f) derselben Hierarchiestufe wie die Funktionen (a, b, c) zugeordnet, da sie direkt zu Erfüllung der Hauptfunktion beitragen. In Abbildung 49 sind diese Funktionen durch gestrichelte Linien an den Funktionenbaum angegliedert. D. h., bei Zuordnung der

³³¹ Die Funktionenbäume wurden unter Anleitung des Autors dieser Arbeit durch die Diplomandin Anne Ruckpaul erstellt. Die Diplomandin hat an keinem Experiment teilgenommen und erst nach Abschluss der Durchführung der Experimente mit der Diplomarbeit und damit mit der Auswertung begonnen

Funktionen wurde besonders darauf geachtet, in welchem Kontext die Probanden die Funktionen aufgeschrieben haben, bevor diese dem Funktionenbaum zugeordnet wurden. Alle Funktionenbäume wurden so in dieselbe Darstellung umgewandelt. Die Hierarchiestufen sind von links nach rechts angeordnet (Abbildung 49).

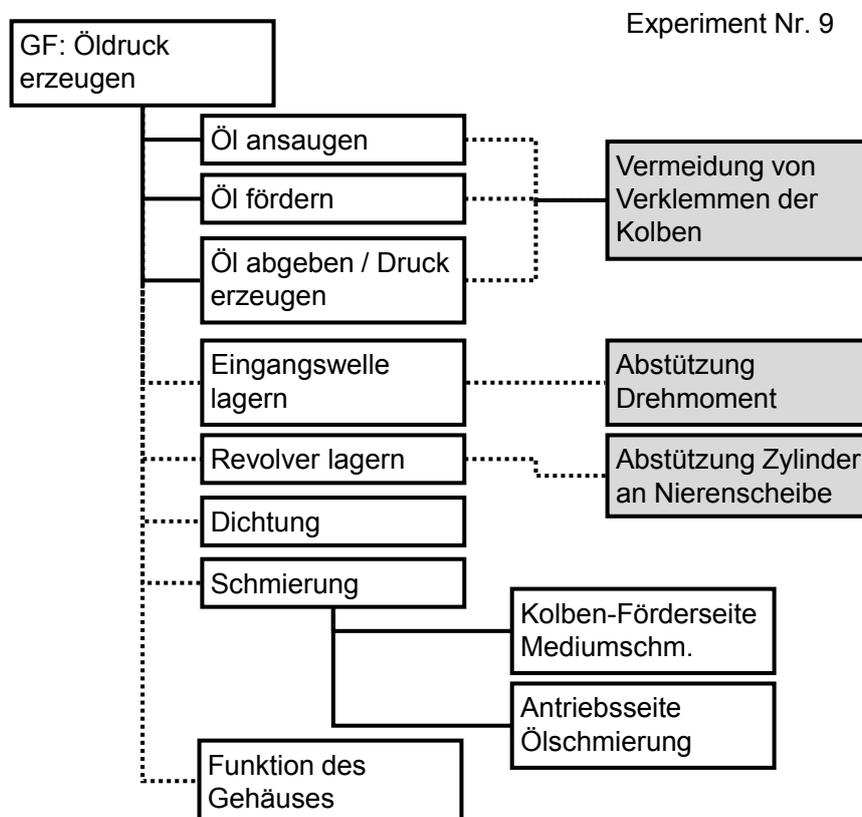


Abbildung 49: Aufbereiteter Funktionenbaum

Fast alle Probanden sprachen weitere Funktionen aus und schrieben diese nicht auf. Diese Funktionen wurden durch die Analyse der Transkriptionen herausgearbeitet und in die Funktionenbaume³³² eingegliedert. Die ausgesprochenen Funktionen sind im aufgearbeiteten Funktionenbaum orange markiert (Abbildung 49). Die Funktion *Vermeiden von Verklemmen der Kolben* wurde vom Probanden Nr. 9 als eine Teilfunktion der drei Funktionen auf der zweiten Ebene erwähnt und somit auch rechts der drei Teilfunktionen angegliedert. Auch die der ausgesprochenen Funktionen wurde immer unter Berücksichtigung des Kontextes in dem der Proband gerade analysierte vorgenommen. Hierzu wurden neben der Transkription auch immer wieder die Videoaufzeichnungen herangezogen. Die ausgesprochenen Funktionen wurden ebenfalls durch gestrichelte Linien an den Funktionenbaum

³³² Dies wurden durch die Diplomandin durchgeführt

angegliedert, damit sichtbar bleibt, dass diese Zuordnung nicht durch den Probanden selbst durchgeführt wurde.

Die Auswertung des Experimentes wurde zweistufig in einer quantitativen und einer detaillierteren Analyse vorgenommen. In der quantitativen Analyse wurden alle 20 Datensätze berücksichtigt, wohingegen in der detaillierten Analyse 8 repräsentative Datensätze untersucht wurden. Diese Aufteilung der Auswertung wurde aufgrund einer Aufwand-Nutzen Abschätzung vorgenommen.

6.1.4 Quantitative Auswertung aller 20 Datensätze³³³

Ziel der quantitativen Auswertung ist es, Aussagen über die Qualität der Funktionsstrukturen der Probanden zu erhalten, indem aufgeschriebene und ausgesprochene Funktionen zunächst gezählt wurden. Als Qualitätsmerkmale wurden die Anzahl an Funktionen, die Struktur, die angemessene Formulierung und die Vollständigkeit herangezogen. Durch das Zählen der Funktionen in Kombination mit der Darstellung und der Formulierung konnten so Erkenntnisse zur Auffassung³³⁴ und der Vorgehensweise der einzelnen Probanden gewonnen werden. Des Weiteren konnte so gezielt nach Schwierigkeiten beim Umgang mit Funktionen gesucht werden und die Bedeutung der expliziten Funktionsdarstellung im C&C-Ansatz bewertet werden.

Abbildung 50 zeigt zwei Funktionenbäume, die sich stark in der Anzahl der aufgeschriebenen und ausgesprochenen Funktionen unterscheiden.

Proband Nr. 10 ermittelte neun Funktionen, die Hauptfunktion und acht Teilfunktionen. Fünf Teilfunktionen wurden aufgeschrieben (Abbildung 32). Die weiteren Funktionen wurden während des Experimentes vom Probanden ausgesprochen. Diese sind in Abbildung 32 grau hinterlegt. Da alle Teilfunktionen auf derselben Ebene angeordnet wurden und somit direkt zur Erfüllung der Hauptfunktionen beitragen, entsteht ein flacher Funktionenbaum auf zwei Hierarchieebenen. Im Gegensatz hierzu erstreckt sich der Funktionenbaum von Proband Nr. 2 über vier Ebenen und beinhaltet 17 Funktionen. Proband Nr. 2 ist einer von zweien, die alle ausgesprochenen Funktionen auch aufgeschrieben haben. Aufgrund des Zeitlimits schrieb der Proband vier Funktionen auf, ohne diese in den Funktionenbaum einzuordnen. Diese Funktionen wurden bei der Aufbereitung der Daten in den Funktionenbaum auf der zweiten Ebene nachträglich eingeordnet. Die

³³³ Diese Auswertung wurde von FRAU DR. ECKERT und dem Autor dieser Arbeit geplant. Durchgeführt wurde die Auswertung durch die Diplomandin

³³⁴ Als Auffassung wird in dieser Arbeit das bezeichnet, was die Probanden und Projektbearbeiter meinen unter Funktion zu verstehen. Wie im Lauf der Arbeit gezeigt wird richtet sich diese Meinung entweder auf die Bedeutung, die Darstellung oder die Formulierung von Funktion

Verbindung dieser Funktionen zum Funktionenbaum ist daher durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet.

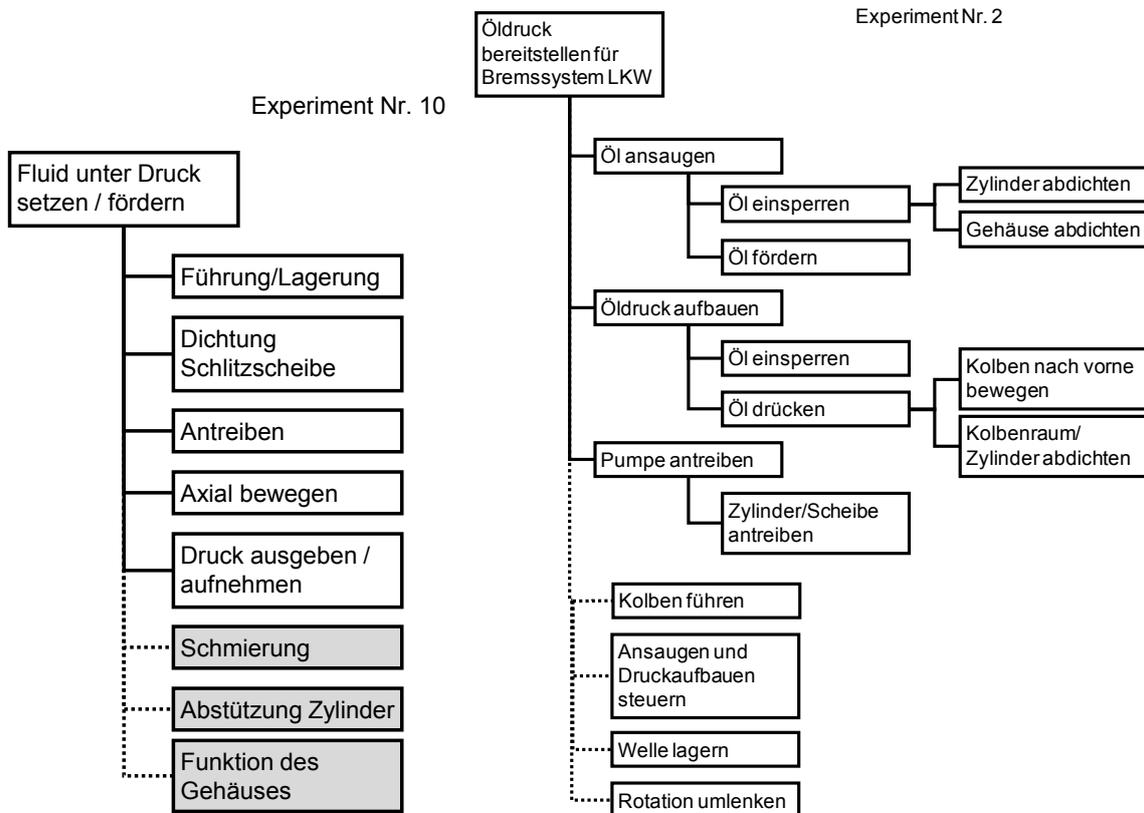


Abbildung 50: Funktionenbäume mit unterschiedlichen Hierarchieebenen

Protokoll Analyse

Obwohl die Audioaufzeichnungen in eine Transkription überführt wurden und alle Notizen und Skizzen auf dem A1 Papier vorliegen, wurde eine Menge an nicht zugänglicher Information generiert. Mithilfe der Protokollanalyse³³⁵, die auch für die Analyse verbaler Daten geeignet ist, wurden die Datensätze ausgewertet. Da die Daten des Experimentes aufgrund iterativer und sprunghafter Vorgehensweisen schwer zu segmentieren sind, wurden direkt Codierungsschemas erstellt³³⁶. Ausgehend von einem einzelnen Datensatz wurden hierzu auffällige Situationen beschrieben, geordnet, klassifiziert und in ein vorläufiges Codierungsschema überführt. Dieses wurde anschließend auf die verbleibenden Videoaufzeichnungen

³³⁵ (Ericson, et al., 1993), die Datensätze werden, wenn die möglich ist, zunächst in sinnvolle Segmente unterteilt, bevor das Codierungsschema angewendet wird.

³³⁶ Üblicherweise werden hierzu Codierungsschemas auf Basis bereits existierender, ähnlicher Untersuchungen erzeugt. Da jedoch ein Experiment, wie das vorliegende, noch nie durchgeführt wurde mussten völlig neue Codierungsschemas erzeugt werden, indem die Videoaufzeichnungen angesehen und die Transkriptionen gelesen wurden.

und Transkriptionen angewandt und korrigiert, sodass das in Tabelle 2 gezeigte Schema entstanden ist.

Funktionen
Aufgeschriebene und ausgesprochene Funktionen
Auffassung des Begriffs Funktion
Unterscheidung zwischen Funktion und Verhalten
Art und Weise der Identifikation von Funktionen
Verlauf und gewählte Vorgehensweise der Probanden
Beibehaltung der Vorgehensweisen, Abweichungen
Charakteristisches und Eigenarten
Anwendung von C&C-M
Information über die Richtigkeit der Anwendung
Hierarchieebene, auf der der C&C-Ansatz angewandt wurde.

Tabelle 9: Codierungsschema der quantitativen Auswertung

Die Ergebnisse der quantitativen Analyse sind ab Abschnitt 6.2 zusammen mit den Ergebnissen der nachfolgend beschriebenen detaillierten Analyse erläutert. Die quantitative Analyse der 20 Datensätze zeigte, dass eine Vertiefung der Analyse an einigen Stellen sinnvoll ist.

6.1.5 Detaillierte Analyse von acht Datensätzen³³⁷

Die Auswahl der Probanden³³⁸, die vertieft ausgewertet wurden, wurde auf Basis der Ergebnisse der ersten quantitativen Auswertung durchgeführt. Für die detaillierte Auswertung wurde ein neues Codierungsschema erstellt. Um herauszustellen, ob und wie auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen unterschiedliche Auffassungen von Funktion verwendet werden und um die Art und Weise der C&C-Anwendung auf unterschiedlichen Ebenen zu bewerten, wurden detaillierte Verläufe der Betrachtungsebenen herausgearbeitet. Nachfolgend werden zunächst das detaillierte Codierungsschema, danach die ausgewählten Probanden und anschließend die Erstellung der Verläufe der Betrachtungsebenen beschrieben.

6.1.5.1 Protokoll Analyse und Codierungsschemas

Tabelle 3 beschreibt die in den drei Kategorien durchgeführte, detaillierte Analyse:

³³⁷ Diese Auswertung wurde von Frau DR. ECKERT und dem Autor dieser Arbeit geplant. Durchgeführt wurde die Auswertung durch die Diplomandin

³³⁸ Diese Auswahl wurde von Frau DR. ECKERT und der Diplomandin vorgenommen

Verlauf des Experimentes	
Hierarchieebene	Die aktuelle Detaillierungsebene auf der analysiert wird; Zeitpunkte des Wechsels der Hierarchieebene.
Fragen des Experimentators	Fragen, die einen Wechsel der Detaillierungsebene veranlassen können.
Art und Weise der Identifikation von Funktionen	
Ausgesprochene Funktionen	Zeitpunkt, zu dem Funktionen ausgesprochen wurden.
Ausgesprochene Funktionen	Art und Weise der Formulierung
Aufgeschriebene Funktionen	Zeitpunkt, zu dem Funktionen aufgeschrieben wurden.
Aufgeschriebene Funktionen	Art und Weise der Formulierung
Hierarchieebene	Ebene, auf der die Funktionen benannt wurden.
Anwendung von C&C-M	
Hierarchieebene	Hierarchieebene, auf der der C&C-Ansatz angewandt wurde.
Komponenten und Funktionen	Komponenten und Funktionen, für die C&C-M angewandt wurde.
Probleme	Probleme, die während der Anwendung von oder durch C&C-M auftraten.
Art der Zuordnung	Die Art und Weise wie Funktion und Gestalt zugeordnet wurden

Tabelle 10: Codierungsschema für die detaillierte Analyse

6.1.5.2 Auswahl der Probanden

Proband Nr. 5: Der Proband hatte zum Zeitpunkt des Experimentes zwei Jahre Berufserfahrung. Seine Analyse auf Basis der zweidimensionalen Zeichnungen verlief entsprechend des Kraftflusses durch das System. Er schrieb fünf Funktionen auf und formulierte diese sehr abstrakt. Der Proband ist interessant im Hinblick auf den Vergleich von ausgesprochenen und aufgeschriebenen Funktionen.

Proband Nr. 8: Der Proband ist fachlich der erfahrenste aller Probanden und analysierte die Zeichnung opportunistisch. Er schrieb viele Funktionen auf und war flexibel bei deren Formulierung. Er sprach nur wenige Funktionen mehr aus, als er aufschrieb. Der Proband hatte große Probleme die Funktionen zu strukturieren und in einem Funktionenbau anzuordnen.

Proband Nr. 9: Der Proband analysierte den Pumpmechanismus des physischen Pumpenmodells vor allen anderen Teilsystemen, denn dieser repräsentierte für ihn das wichtigste Teilsystem. Mit fünf Jahren Berufserfahrung ist er einer der erfahreneren Probanden, jedoch wandte er den C&C-Ansatz kaum an. Obwohl der

Proband eigentlich nur Interesse für den Pumpmechanismus hatte, identifizierte er auch die meisten anderen Funktionen, analysierte diese jedoch nicht sehr detailliert.

Proband Nr. 11: Der Proband hatte ein Jahr Berufserfahrung und schrieb bei der Analyse der Zeichnung drei Funktionen auf. Er schien die Funktionen der Pumpe zu Beginn vollständig zu verstehen, jedoch hatte er zum späteren Zeitpunkt Probleme, einige Funktionen auf detaillierter Ebene herauszuarbeiten.

Proband Nr. 13: Der Proband zählte ebenfalls zu den erfahreneren Probanden und analysierte das physische Modell der Pumpe. Er verwendete unterschiedliche Darstellungen des C&C-Ansatzes auf unterschiedlichen Hierarchiestufen. Er ging themenbestimmt vor und betrachtete vorwiegend Aspekte, die er für interessant hielt. Andere Aspekte wurden ignoriert.

Proband Nr. 17: Der Proband ist mit zwei Jahren Berufserfahrung eher unerfahren. Er realisierte nicht, dass Teile des Zylinders des physischen Modells zur Visualisierung entfernt wurden. Er identifizierte viele Funktionen und führte eine eher vollständige Analyse der Pumpe durch. Er verband Funktion und Gestalt in seiner verbalen Beschreibung, jedoch hielt er diese Zuordnung nicht auf dem Papier fest.

Proband Nr. 30: Der Proband hatte fünf Jahre Berufserfahrung und analysierte das physische Modell der Pumpe. Er verband Funktionen und Gestalt auf unterschiedliche Art und Weise. In einigen Fällen ordnete er Funktionen WFP zu, dann auch ordnete er Funktionen und LSS zu oder er ordnete Funktionen WFP und LSS zu. Er ging top-down vor und hatte bei der Anwendung des C&C-Ansatzes bei bestimmten Funktionen Probleme alle relevanten WFP und LSS zu identifizieren.

Proband Nr. 31: Mit drei Jahren Berufserfahrung schrieb der Proband drei Funktionen auf, wobei er weitere aussprach. Wie auch Proband Nr. 30 ging er bei der Analyse des physischen Modells der Pumpe top-down vor. Er hatte Probleme beim Formulieren der Funktionen und er brauchte lange beim Auffinden der richtigen WFP und LSS.

6.1.5.3 Verlauf der Betrachtungsebenen

Um einen vertieften Vergleich der Datensätze zu ermöglichen, wurde den Transkriptionen eine Zeitachse mithilfe der Videoaufzeichnungen beigefügt. Dies ermöglichte zum einen eine vereinfachte Orientierung während der Auswertung, zum anderen war es dadurch möglich, Pausen und Unterbrechung zu identifizieren.

In Tabelle 11 sind die ersten 20 Minuten des Verlaufs der Betrachtungsebenen von Proband Nr. 5 tabellarisch dargestellt, um zu zeigen, wie ausgewertet wurde. Es wurden vier Betrachtungsebenen identifiziert. Die Ebene des „Überblicks“ repräsentiert die höchste Betrachtungsstufe. Auf ihr befanden sich die Probanden, wenn sie beispielsweise die Hauptfunktion oder die gesamte Pumpe beschrieben. Die

niedrigste Betrachtungsebene ist die Ebene einzelner Elemente, beispielsweise einzelne Bauteile und deren Funktionen. Zwischen diesen beiden Extremen wurden zwei weitere Ebenen eingefügt und als Teilsystem und Teil-Teilsystem bezeichnet. Diese Einteilung wurde auf Basis einer ersten qualitativen Sichtung der Experimente vorgenommen. Fragen des Experimentators sind ebenfalls eingetragen, da diese Ursache für Pausen oder den Wechsel des Fokus sein können. Beispielsweise zum Zeitpunkt 0:09:30 fragte der Experimentator, wie der *Druck bereitgestellt* wird. Der Proband fokussierte dann auf die Druck- und Saugseite und später auf die Steuerplatte sowie Anschlussplatte, um deren Funktionen zu erklären. Die grau hinterlegten Zeilen halten fest, zu welchen Zeitpunkten der Proband Funktion und Gestalt zugewiesen hat.

Abstraktionsebene				
Zeit	Ebene 4: Überblick	Ebene 3: Teilsystem	Ebene 2: Teilteilsystem	Ebene 1: einzelnes Element
0:02:30	Ganze Pumpe			
0:03:00	Pumpmechanismus			
0:04:00	Hauptfunktion			
0:05:30		Benennt Teilfunktionen		
0:09:30	Frage: Wie wird der Druck bereitgestellt?			
0:11:00			Druck- und Saugseite	
0:12:00				Steuerplatte und Anschlussplatte
0:16:00	Liest nochmals die Anweisungen			
0:16:30		Teilfunktionen		
0:17:45				Feder
0:18:00				Mittelzapfen
0:19:15		Teilfunktion Energie bereitstellen		
0:19:30		Linkes Teilsystem (von der Welle zum Kolben)		
0:20:00				Markiert WFP an Welle und Kolbenende

Tabelle 11: Verlauf des Experimentes Nr. 5

Die Ebenen wurden durchnummeriert und auf einem Zeitstahl angeordnet. Abbildung 51 zeigt, dass Ebene Nr. 4 die Ebene des Überblicks ist und Ebene Nr. 1 die Ebene der einzelnen Elemente.

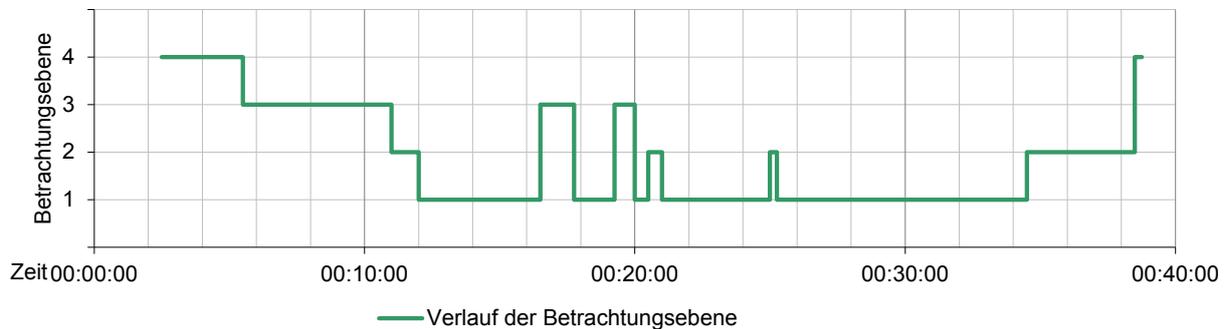


Abbildung 51: Verlauf der Betrachtungsebenen von Proband Nr. 5

Der Verlauf der Linie zeigt, zu welchem Zeitpunkt die Betrachtungsebene gewechselt wurde.

6.1.5.4 Betrachtungsebene der aufgeschriebenen und ausgesprochenen Funktionen

Um zu bestimmen, ob die Betrachtungsebene mit der Aufzeichnung der Funktionen korreliert, wurden aufgeschriebene und ausgesprochene Funktionen mit dem Verlauf des Experimentes gekoppelt. Des Weiteren kann so nachvollzogen werden, auf welcher Ebene Funktionen ausgesprochen und auf welcher Ebene Funktionen aufgeschrieben wurden. Die jeweiligen Zeitpunkte finden sich nun in derselben Darstellung mit den Betrachtungsebenen wieder (Abbildung 52). Tabelle 12 zeigt einen Auszug der Auswertung des Datensatzes von Proband Nr. 5. Der graue Hintergrund zeigt zusätzlich, dass zu diesem Zeitpunkt die Funktion einer Gestalt zugeordnet wurde.

Zeit	Aufgeschriebene Funktionen	Zeit	Ausgesprochene Funktionen
		0:03:00	„Diese Rotationsbewegung wird in eine Translationsbewegung der Kolben umgewandelt“
		0:03:15	(Kolben) „sind in der Lage, Medium von der Saugseite zur Druckseite zu fördern“
0:05:00	Druck erzeugen	0:03:45	Die Hauptfunktion ist Medium fördern und Druck aufzubauen“
0:06:30	Energie bereitstellen	0:06:00	„Energie bereitstellen“
		0:06:00	„Energie wandeln“
		0:06:15	Flüssigkeit transportieren, komprimieren“
0:07:30	Medium/Fluid bereitstellen	0:07:30	„Medium zum Pumpen oder komprimieren bereitstellen“
0:08:45			

	Medium/Fluid fördern		
0:09:00	Fluid ansaugen	0:09:00	„Ansaugen“
0:09:15	Fluid abgeben	0:09:15	„Fluid fördern oder abgeben“
		0:09:45 – 0:15:45	Erklärung wie der Druck aufgebaut wird.
		0:19:15	„Energie bereitstellen“
		0:19:45	„Hier ist mechanische Energie im System, die in die Kolben geleitet wird“

Tabelle 12: Auszug aus der detaillierten Analyse für Funktionen (Proband Nr. 5)

Abbildung 52 zeigt schließlich die kombinierte Darstellung aller genannten Daten. Die Linie zeigt den Zeitpunkt, zu dem Funktion und Gestalt explizit zugeordnet wurden. Die Funktionen wurden ebenfalls der jeweiligen Betrachtungsebene zugewiesen, sodass gezeigt werden kann, ob die Abstraktionsebene der Formulierung der Funktionen mit der Betrachtungsebene korreliert.

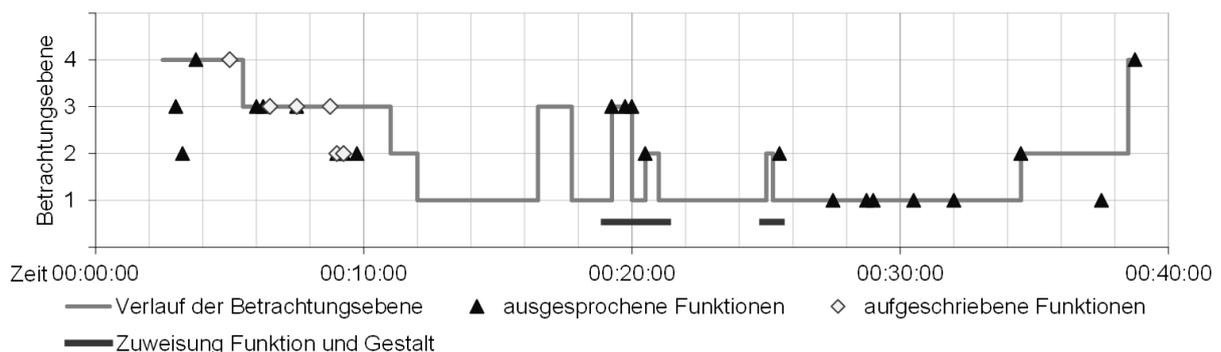


Abbildung 52: Verlauf und Zeitpunkte der Funktionsformulierung (Proband Nr.5)

Da in dieser Arbeit aufgrund der Datenmenge nicht alle Aufzeichnungen gezeigt werden können und dies auch nicht sinnvoll ist, werden nachfolgend zwei Datensätze beschrieben, um einen Eindruck zu vermitteln, was nach einer Stunde Experiment vorliegt.

6.1.6 Typische Ergebnisse der Probanden

Die Darstellungen der Aufzeichnungen auf dem A1 Papier unterscheiden sich auf den ersten Blick signifikant. Im Gegensatz zu den neun Probanden, die das Experiment auf Basis der Zeichnung durchgeführt haben, zeichneten zehn der elf Probanden, die das physische Modell der Pumpe analysiert hatten, Skizzen oder

schematische Darstellungen³³⁹ von Teilen der Pumpe. Aus der Gruppe der neun Probanden mit Zeichnung zeichnete lediglich 1 Proband. In die Zeichnung konnten WFP und LSS zur Markierung der Funktionen direkt eingetragen werden, sodass weitere Skizzen überflüssig erscheinen.

Ein typisches Ergebnis eines Probanden mit physischem Modell wurde bereits in Abbildung 48, Seite 121 gezeigt. Der Proband fertigte Skizzen der Geometrie des Systems an, um sich die Funktionen zu erarbeiten. Die Hauptfunktion wurde in drei Teilfunktionen eingeteilt: *Öl ansaugen*, *Öl weiterfördern* und *Öl abgeben/Druck erhöhen*. Um diese zu erläutern, zeichnete der Proband kleine Skizzen, die jeweils die Funktion darstellen. Die uninteressanten Funktionen (f im Bild) werden nicht dargestellt. Am Ende des Experimentes fragte der Experimentator eine letzte Frage, um zu überprüfen, ob der Proband die Bewegungen der Kolben wirklich verstanden hatte. Er fragte, was die Funktion des Mittelzapfens sei. Als Antwort zeichnete der Proband zwei weitere Skizzen. Die obere Skizze (g) zeigt den Winkelversatz, der für die Translationsbewegung der Kolben relativ zum Zylinder sorgt. In der unteren Skizze leitete der Proband die Gestalt des Mittelzapfens mithilfe des Experimentators her. Der Hinweis, dass sich in der Mitte des Zapfens eine Feder befindet, half dem Probanden sein Verständnis für den Mittelzapfen und die Lagerung des Zylinders auszuweiten.

Probanden, die auf Basis der Zeichnung gearbeitet haben, schrieben die Funktionen häufig mit Bezug zu den WFP und LSS auf. Diese konnten sie in die Zeichnung eintragen. Abbildung 53 zeigt ein typisches Ergebnis eines Probanden aus dieser Gruppe. Auf der linken Seite ist die Darstellung der Funktionen als Boxdarstellung gezeigt. Die Teilfunktionen sind innerhalb der großen Box angeordnet (b). Die Nebenfunktion „Reibung minimieren“ ist an die große Box außen angegliedert (c). Der Proband markierte die Wirkflächenpaare WFP1.1 und WFP1.2 (d) in der Zeichnung auf der rechten Seite, wie auch in der Boxdarstellung wird auf der linken Seite. Viele weitere WFP und LSS sind in der Zeichnung eingezeichnet.

Nicht alle Probanden strukturierten die Funktionen in einem klassischen Funktionsbaum, da im Experimentprotokoll lediglich danach gefragt wurde, die identifizierten Funktionen in einem Baum zusammenzufassen. Zwei Probanden strukturierten die Funktionen weder in einem Baum noch in irgendeiner hierarchischen Weise.

³³⁹ Darstellungen die die Gestalt der Pumpe oder Teile hiervon andeuten. Eine Skizze ist im Vergleich hierzu konkreter und beinhaltet mehr Gestalt

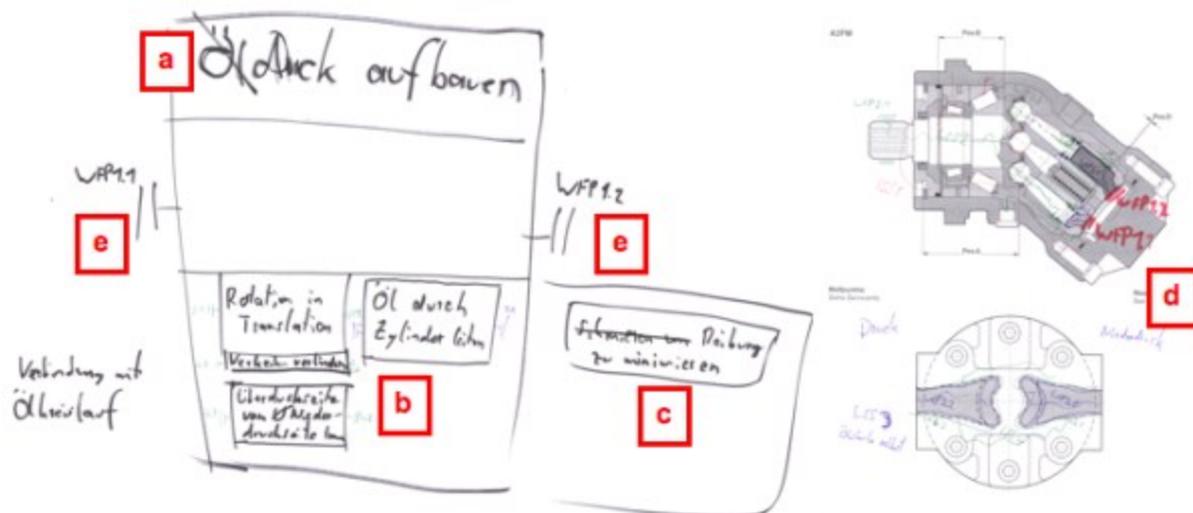


Abbildung 53: Typisches Ergebnis eines Probanden mit Zeichnung (Proband Nr. 18)

In drei anderen Fällen ist zwar eine Struktur zu erkennen, die Ähnlichkeit mit einem Funktionenbaum aufweist, jedoch jeweils eine Boxdarstellung dargestellt (Abbildung 53). Ein Proband hat lediglich eine Funktion aufgeschrieben, sodass hier nicht von einer Struktur gesprochen werden kann.

6.2 Unterschiedliche Auffassung von Funktion

Dieser Abschnitt gibt die Ergebnisse bezogen auf die Auffassungen³⁴⁰ der Probanden von Funktionen wieder. Es wird nicht mehr unterschieden zwischen quantitativer und detaillierter Auswertung. Zuerst werden Interpretation, die aus der quantitativen Auswertung gewonnen wurden erklärt, danach wird diese Erklärung in einigen Fällen durch die detaillierte Auswertung vertieft.

6.2.1 Unterschiedliche Bedeutung und Darstellung von Funktion

Die im Abschnitt Stand der Forschung aufgezeigten Unterschiede in den Bedeutungen von Funktion wurden durch das Experiment bestätigt. Die Auffassung der Probanden variiert zwischen Funktion in Sinne von Zweck und Funktion als die Beziehung zwischen Input und Output, der Transformation von Material, Energie und Information als eine Beschreibung des Verhaltens.

Am Ende jeden Experimentes wurden die Probanden nach ihrer Auffassung von Funktion gefragt und gebeten, eine Definition von Funktion zu geben. Die Aussagen variieren wie in der Literatur³⁴¹ aufgezeigt. Tabelle 13 zeigt die geordneten

³⁴⁰ Als Auffassung wird in dieser Arbeit das bezeichnet, was die Probanden und Projektbearbeiter meinen unter Funktion zu verstehen. Wie im Lauf der Arbeit gezeigt wird, richtet sich diese Meinung entweder auf die Bedeutung, die Darstellung oder die Formulierung von Funktion

³⁴¹ Siehe Abschnitt 2.3, S.2424

Ergebnisse der Befragung. Die linke Spalte der Tabelle beschreibt die Bezeichnung, die rechte Spalte gibt die zugeordneten Antworten wieder.

Auffassung:	Antworten:
Zweck	Nützlichkeit eines Systems; Muss einen Zweck erfüllen; Funktionen sind auch Anforderungen; Erlauben Ziele zu erfüllen
Flussgrößen	Fluss von Material, Energie und Information
Syntaktisch	Braucht ein Verb; Zuerst ein Subjekt; Verb und Subjekt
Transformation	Transformation eines Input in einen Output, Zustandsänderung
Eigenschaft der Funktion	Muss quantifizierbar sein; muss auf Gestalt bezogen sein.
Andere	Existieren auf der Ebene von Prinziplösungen; lösungsneutrale Beschreibung, von was ein System macht.

Tabelle 13: Variation in der Auffassung von Funktionen

Die Tabelle zeigt, dass die Probanden nicht nur unterschiedliche Auffassung davon haben, was eine Funktion ist, sondern auch wie eine Funktion dargestellt oder formuliert werden sollte. Die Auffassung von Funktion wird entweder an die Art der Darstellung, die Bedeutung oder die Art der Formulierung geknüpft.

Nur wenige Probanden äußerten eine Unterscheidung in der Bedeutung von Funktion im Sinne von Zweck und Funktion im Sinne des Verhaltens. Nach Meinung einiger Probanden sind Funktionen etwas Statisches, wohingegen das Verhalten des Systems etwas Dynamisches, unter Umständen auch ungewolltes ist.

Obwohl jeder Proband eine bestimmte Auffassung³⁴² von Funktion hat, wurde an dieser Auffassung im Experiment nicht festgehalten. Dieser Wechsel der Auffassung geschieht nicht explizit, sondern unbewusst. Nur Probanden die mehrere, unterschiedliche Auffassungen bereithalten, konnten diese auch im Experiment anbringen. Beispielsweise behauptet Proband Nr. 11, dass eine Funktion als eine Transformation von einem Zustand A in einen Zustand B zu definieren sei. Bei der Analyse der Pumpe verwendet er diese Definition nur für die Hauptfunktion *Leistung wandeln*. Dem fügte er den Zusatz *Drehmoment mal Winkelgeschwindigkeit = Druck mal Volumen* hinzu, jedoch formuliert er danach alle anderen Funktionen gemäß des Verhaltens als *Fluid fördern* oder als Potenzielle Funktion als *Rotation ermöglichen*.

Die Definition der Funktion als Transformation von Input und Output, wurde nur im Falle von offensichtlich unterschiedlichen Input und Output Größen verwendet,

³⁴² Siehe Abschnitt 6.2.1

beispielsweise „Rotation in Translation umwandeln“. Die Beschreibung von Funktion mit Hilfe von Flüssen von Material, Energie und Information wurde in keinem der Datensätze angewandt. Zwei Probanden verwendeten die Taxonomie von Material, Energie und Information, um zu beschreiben, welcher Effekt in WFP auftritt und um darzulegen, wie Kräfte in das System geleitet werden.

6.2.2 Unterschiedliche Formulierungen von Funktionen

Neben den unterschiedlichen Bedeutungen und Darstellungen von Funktion, variiert die Art und Weise wie Funktionen formuliert werden ebenfalls erheblich. Einige Probanden formulieren Funktionen sehr konkret und auf die Gestalt bezogen, sodass sich die Beschreibung stark auf das vorliegende System bezieht. Andere Probanden formulieren die Funktionen eher abstrakt, ohne Bezug zur Gestalt und zum vorliegenden System. Diese beiden Extreme spannen ein Spektrum auf, in welchem sich alle Probanden einordnen lassen. Des Weiteren formulieren einzelne Probanden die genannten Funktionen auch mehrfach und unterschiedlich abstrakt. Beispielsweise formuliert Proband Nr. 9 die Hauptfunktion zunächst als *Öldruck erzeugen* (a in Abbildung 48). Zu einem späteren Zeitpunkt benannte er diese Funktionen um in *Umwandlung von mechanischer in hydraulische Leistung*. In Tabelle 14 sind die von den Probanden formulierten Hauptfunktionen aufgelistet und der Abstraktionsebene zugeordnet.

Abstraktionsebene	Beispiele (Anzahl Probanden)
Konkrete Formulierungen (12)	Fluid/Öl fördern (6); Druck/Öldruck bereit stellen (4); Öldruck für ein Hydrauliksystem bereit stellen (1); Fluid beschleunigen, Druck bereit stellen (1)
Abstrakte Formulierungen (6)	Mechanische Energie in hydraulischen Energie wandeln (2); Mechanischen Rotation in hydraulischen Fluss und Druck wandeln (2); Leistung wandeln (1); Einen Volumenstrom von A nach B bereit stellen (1)
Gemischt (1)	Öldruck bereit stellen -> Mechanische in hydraulische Energie wandeln (1)

Tabelle 14: Abstrakte und konkrete Formulierungen von Funktionen

Ein Proband schrieb keine Hauptfunktion auf. Die Hauptfunktion der Pumpe wurde von allen Probanden richtig erkannt. Diese war schon im Experimentprotokoll genannt. Von 2 Probanden wurde erkannt, dass die Pumpe ebenso als Motor eingesetzt werden kann.

Formulierung von Funktionen bei unterschiedlichen Aktivitäten

Die meisten Funktionen wurden auf das Verhalten des Systems oder Teilsystems bezogen formuliert, d. h., sie gaben eher wieder, was sich im System abspielt und vernachlässigten die Wirkung auf die Nachbarsysteme. Viele Probanden hielten sich

hierbei unbewusst, zumindest anfangs³⁴³ an die Konvention, Funktion mit einer Verb-Substantiv Paarung zu beschreiben. Proband Nr. 17 formulierte die Funktionen fast ausschließlich auf diese Weise (Abbildung 54). Der Proband versteht unter einer Funktion also hauptsächlich etwas, das mit einer Verb-Substantiv Paarung zu beschreiben ist. Aus diesem Grund kostete es den Probanden jedoch viel Aufwand, die Funktionen in ein geeignetes neues Format zu bringen. Er versuchte, etwas zu beschreiben, was mit nur zwei Worten schwer möglich ist. Er schlug auch vor, dass es besser würde, wenn er Fließtext verwenden dürfte, jedoch würde dies ja dann keiner Funktion mehr entsprechen. Er richtete seine Auffassung von Funktion also in erster Linie an der Art der Formulierung aus. Er nahm keine Unterscheidung für unterschiedliche Bedeutungen vor. Da ihm dann die Beschreibungsmittel für die Situation fehlten, geriet er oft in Schwierigkeiten.

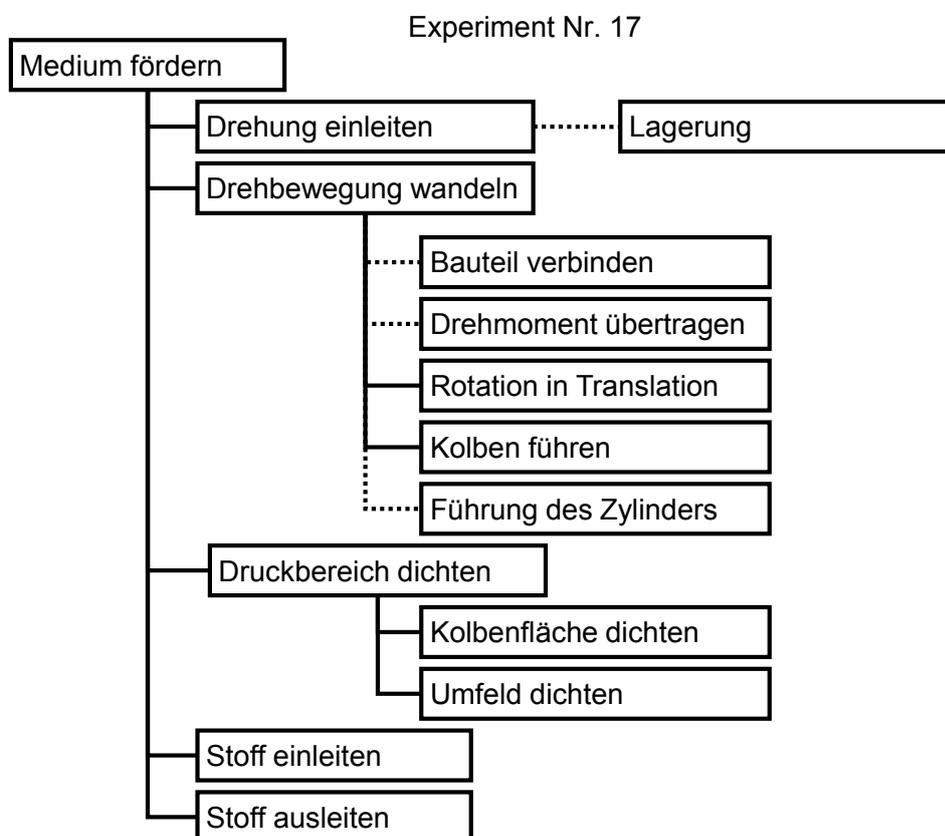


Abbildung 54: Funktionsbaum von Proband Nr. 17

Dies scheint bei erfahrenen Probanden anders zu sein. Fehlen Beschreibungsmittel werden weitere, der Situation gerecht werdende Mittel angewandt oder selbst entwickelt. So hatten Proband Nr. 8 und Proband Nr. 30 keine Probleme, Funktionen auf unterschiedliche Art flexible zu formulieren. Beide gehören zu den erfahrenen

³⁴³ Siehe auch Abschnitt zuvor

Probanden und konnten in ihren Analysen auf unterschiedliche Arten der Formulierung und Darstellung zurückgreifen, die sie offenbar in ihrer Laufbahn irgendwann bereits angewandt haben.

Ein ähnliches Phänomen wie die Formulierung in zwei Worten tritt auf, wenn Probanden sich an die Konvention *Funktionen lösungsneutral zu formulieren* halten wollen³⁴⁴. Dies erklärt das Fehlen von aufgeschriebenen Funktionen auf detaillierter Ebene. Dort beinhalten die Beschreibungen der Funktionen meistens bauteilbezogenen Ausdrücke, die nach Auffassung der Probanden nicht in die Beschreibung der Funktion gehören. Die Funktionen werden dann derart abstrahiert, dass sehr viel Information verloren geht. Dies erscheint den Probanden trivial und sie explizieren diese Funktion nicht. Die Probanden brechen das Aufzeichnen dieser Funktionen dann ab.

Die Probanden sprachen die Funktionen oftmals zuerst sehr konkret aus, abstrahierten diese aber, um sie aufzuschreiben. Beispielsweise schrieb Proband Nr. 13 die Hauptfunktion des Systems als *Gewährleistung eines Volumenstroms von A nach B* auf, formulierte dies kurz zuvor jedoch verbal als *Hydraulik Öl pumpen*. Einige Probanden zogen es vor, Funktionen mit Nomen zu formulieren. Zum Beispiel *Gewährleistung eines Volumenstroms...* oder *Separation eines Teilvolumens*. Die meisten Probanden verwendeten diese Art der Formulierung als substantiviertes Verb für die Funktion „Schmierung“ und „Dichtung“. Diese ein-Wort Funktionen werden dadurch ebenfalls sehr abstrakt und beschreiben sehr pauschal, was in dem System vor sich geht. Diese Funktionen sind Zusammenfassungen von Teilfunktionen, wie beispielsweise *Gehäuse gegen Austritt von Schmiermittel in die Umgebung abdichten*. Durch die Formulierung in einem Wort geht der Bezug der Funktion zur Gestalt verloren. Somit ist es ist dann auch nicht mehr möglich WFP und LSS für diese Funktionen zu lokalisieren, da diese ja praktisch *überall* sind.

Auf einer eher detaillierten Ebene beschrieben die Probanden die Funktionen verbal meistens ausführlicher als schriftlich (Abbildung 52). Hierbei können zwei Gruppen von Probanden unterschieden werden:

- Auf die Umgebung gerichtete *Um-zu* Formulierungen von Funktionen: *Da ist eine Schraube, die Teil des Systems sein kann, um das Öl auszulassen*, beschreibt die Funktion Ziel- oder Zweck-bezogen, gibt einen Eindruck, wie das betrachtete System auf die Umgebung wirkt.

³⁴⁴ Wie dies beispielsweise durch die VDI-Richtlinie 2221 (VDI, 1993) vorgeschlagen wird.

- Auf das Systeminnere gerichtete *Muss* Formulierungen von Funktionen: *dort muss die Rotation in eine axiale Bewegung gewandelt werden*, beschreibt das idealisierte Verhalten. Es wird hiermit eine innere Sicht auf das System gegeben, das was im System *passieren muss*, jedoch nicht, wie es auf die Umgebung wirkt.

Je nachdem welche Formulierung sich am besten zur Funktionsbeschreibung eignete, verwendete der erfahrenste Proband viele unterschiedliche Formulierungsarten. Auch Proband Nr. 30 mit fünf Jahren Berufserfahrung formulierte die Funktionen sowohl Zweck- oder Verhalten-bezogen, auch als Transformation und passte die Art der Formulierung der jeweiligen Situation an³⁴⁵. Somit hatte er wie auch der erfahrenste Proband, keine Schwierigkeiten bei der Formulierung von Funktionen.

Erfahrung beim Umgang mit Funktionen erhöht die notwendige Flexibilität bei der Formulierung. Der Umgang mit Funktionen wird in der Ausbildung in den meisten Fällen immer nur für eine bestimmte Auffassung angeboten (Abschnitt 2.3). Somit sind die in der Theorie gelernten und meist einzeln vorgestellten Ansätze nur in bestimmten Situationen anwendbar und auch nur für spezielle Aktivitäten nützlich. Probanden mit viel Erfahrung haben sich für unterschiedliche Aktivitäten Formulierungen aus unterschiedlichen Modellen zurecht gelegt und können so in jeder Situation auf ein Hilfsmittel zurückgreifen haben. Dies geschieht jedoch unbewusst. Dies zeigt sich darin, dass bei der Frage nach der Auffassung von Funktion lediglich eine einzelne Definition von Funktion als Antwort gegeben wird.

6.2.3 Quantität identifizierter Funktionen

Die Funktionsbäume wurden nach ihrer Aufbereitung hinsichtlich der Anzahl der aufgeschriebenen und ausgesprochenen Funktionen und ihres Layouts untersucht. Die Ergebnisse der Zählung sind in Boxplots³⁴⁶ (Abbildung 55) dargestellt, um die Bandbreite der Daten zu zeigen.

³⁴⁵ Die Konsequenzen hieraus werden in Kapitel 7 unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Kapitel 5 gezogen.

³⁴⁶ Die Daten sind mit einer 5-Werte-Zusammenfassung dargestellt, die aus dem Median, dem oberen und dem unteren Quartil (erstes und drittes Quartil) sowie zwei Extremwerten (Minimum und Maximum) besteht (Hoaglin, et al., 1983). So werden neben der Bandbreite auch die Ausreißerwerte ersichtlich. Die beiden Quartils werden durch das obere und das untere Ende eines Kastens dargestellt. Das untere Ende repräsentiert das 25% Quartil, das obere Ende das 75% Quartil. Die Extremwerte sind durch die beiden Whisker, der Median ist durch einen schwarzen Balken dargestellt. Für aufgeschriebene Funktionen wird ein blauer Boxplot, für ausgesprochene Funktionen ein roter Boxplot verwendet.

In den 20 Datensätzen wurden im Durchschnitt 11,3 Funktionen ermittelt (7,3 aufgeschrieben und 4 ausgesprochen). Der Median³⁴⁷ weicht nur leicht vom Durchschnitt ab. Der Median für aufgeschriebene Funktionen beträgt 6, für ausgesprochene Funktionen beträgt der Median ebenfalls 4. Ein Proband schrieb nur eine Funktion auf, der Maximalwert liegt bei 17 aufgeschriebenen Funktionen. Das Spektrum der ausgesprochenen Funktionen reicht von 0 bis 13 Funktionen.

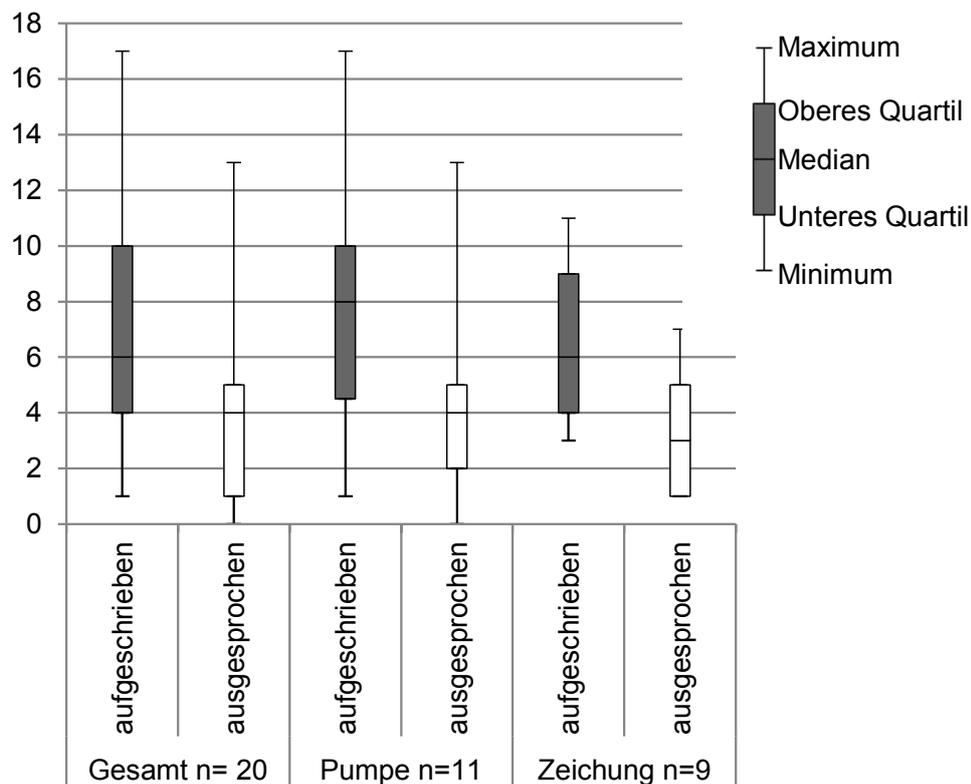


Abbildung 55: Quantitative Werte für die Anzahl von Funktionen – Art des Modells

6.2.3.1 Unterschiede zwischen Analysen mit physischem Modell und Zeichnung

Die Box-Plot-Darstellung in Abbildung 55 verdeutlicht die Unterschiede zwischen der Gruppe mit physischem Modell im Vergleich zu der Gruppe mit Zeichnung. Bei der Anzahl von erfassten Funktionen wird jeweils zwischen aufgeschriebenen und ausgesprochenen Werten unterschieden.

Der Medianwert für Funktionen der Gruppe mit physischem Modell ist leicht höher als der Median der Gruppe mit Zeichnung, wobei die Verteilung der beiden Gruppen sehr ähnlich ist. Die Extremwerte der Gruppe mit physischem Modell sind größer als die der anderen Gruppe, was wohl an der Berufserfahrung der Probanden liegt. Dies wird nachfolgend gezeigt.

³⁴⁷ Median bezeichnet eine Grenze zwischen zwei Hälften. In der Statistik halbiert der Median eine Verteilung. Gegenüber dem arithmetischen Mittel, auch Durchschnitt genannt, hat der Median den Vorteil, robuster gegenüber Ausreißern (extrem abweichenden Werten) zu sein

6.2.3.2 Einfluss der Berufserfahrung auf die Anzahl der Funktionen

In Abbildung 56 ist der Zusammenhang zwischen Berufserfahrung und Anzahl der aufgeschriebenen und ausgesprochenen Funktionen dargestellt. Probanden mit weniger als zwei Jahren Berufserfahrung haben mehr Funktionen ausgesprochen als aufgeschrieben. Mit der Erfahrung kehrt sich dieses Verhältnis um. Bei der Gruppe mit zwei bis fünf Jahren Berufserfahrung wurden schon mehr Funktionen aufgeschrieben als ausgesprochen. Die Gruppe mit drei erfahrenen Ingenieuren (Berufserfahrung über 5 Jahre) schrieben fast alle Funktionen, die sie aussprachen auch auf.

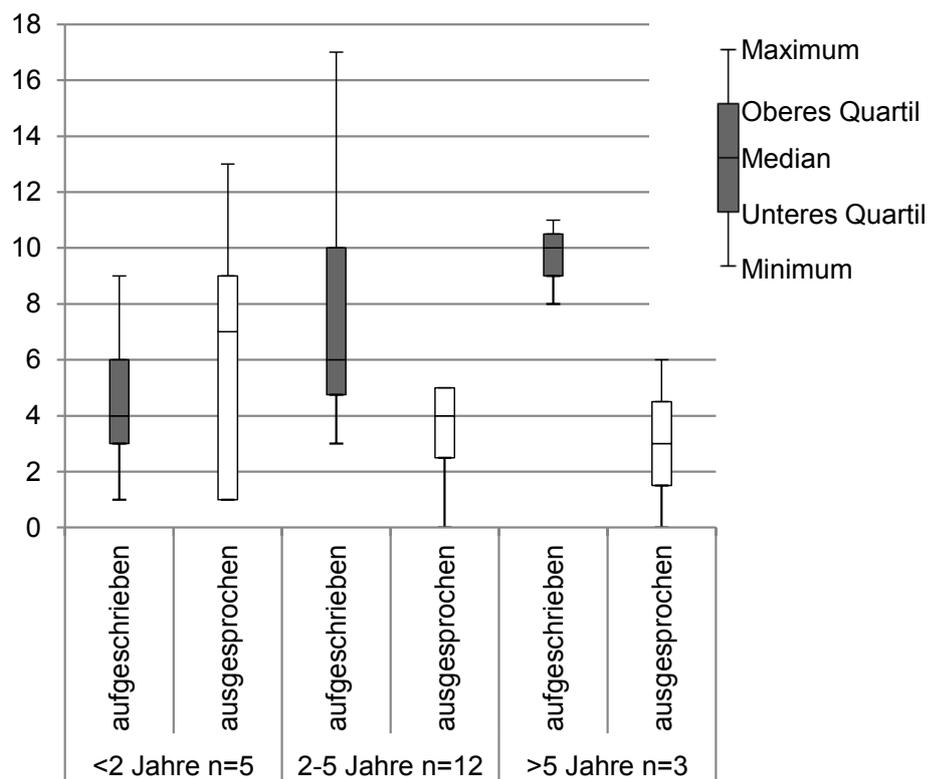


Abbildung 56: Quantitative Werte für die Anzahl von Funktionen – Berufserfahrung

Dies gibt einen Hinweis darauf, dass berufserfahrene Probanden sicherer im Umgang mit Funktionen sind.

6.2.4 Unterschiedliche Hierarchieebenen der Funktionsstrukturen

Durch das Experimentprotokoll³⁴⁸ waren die Probanden dazu aufgefordert, die Pumpe *detailliert* zu analysieren. Während der Analyse arbeiteten sie Teilfunktionen

³⁴⁸ Siehe Abschnitt 6.1.2, S. 119

auf unterschiedlichen Ebenen unter der Hauptfunktion³⁴⁹ heraus. Viele nutzten die eine Stunde Experimentzeit jedoch nicht voll aus.

Um die Funktionenbäume hinsichtlich der Hierarchiestufen zu untersuchen, wurde neben der Anzahl der Funktionen auch die Anzahl der betrachteten Hierarchiestufen herausgearbeitet. Abbildung 50 auf Seite 124 zeigt einen Funktionenbaum mit zwei Hierarchieebenen und acht Funktionen auf der Ebene unter der Hauptfunktion. Daneben ist ein Funktionenbaum mit vier Hierarchieebenen dargestellt. Dieser Baum hat die meisten Funktionen (7) auf der zweiten Ebene (erste Ebene unter der Hauptfunktion).

Abbildung 57 zeigt den Gesamtüberblick dieser Analyse für alle Datensätze. Die hell markierten Punkte stellen die Ergebnisse der Analyse für die aufgeschriebenen Funktionen dar, wohingegen mit den dunkel markierten Bereichen zusätzlich die ausgesprochenen Funktionen dargestellt sind. Die Größe der Bereiche gibt die Anzahl der Probanden an.

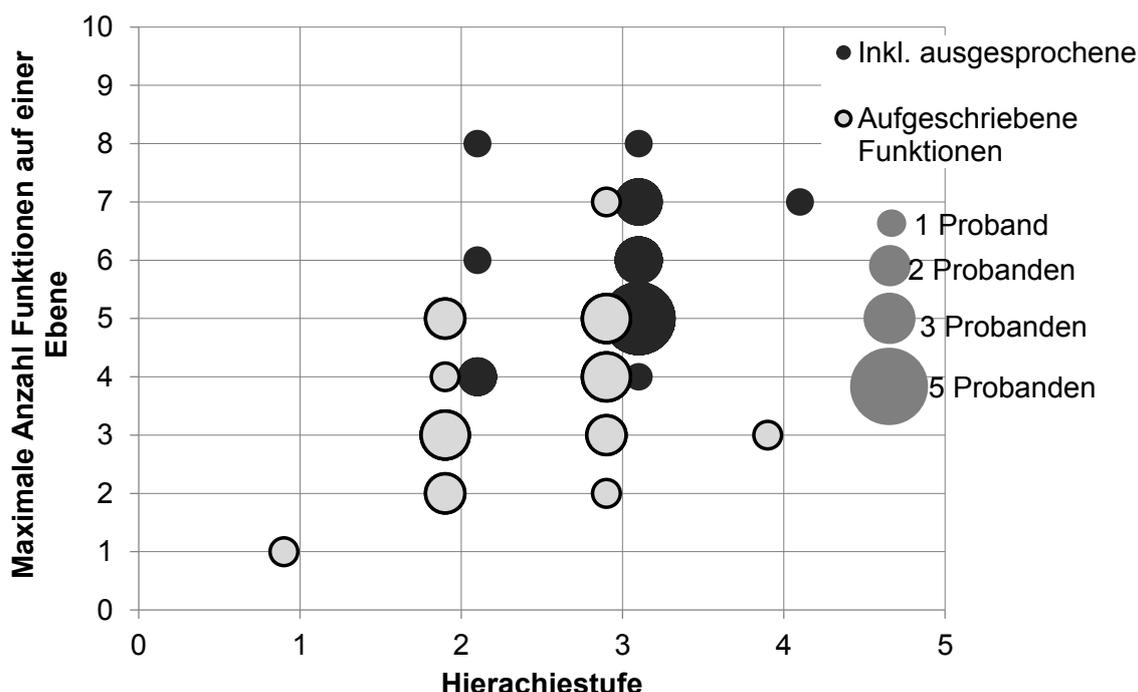


Abbildung 57: Anzahl der erfassten Funktionen und Anzahl der Hierarchieebenen

Werden nur die aufgeschriebenen Funktionen betrachtet, ist festzustellen, dass die meisten Funktionenbäume zwei oder drei Ebenen aufweisen und diese mit drei bis fünf Funktionen besetzt sind. Zieht man zusätzlich die ausgesprochenen Funktionen hinzu, werden die meisten Bäume breiter, da die Probanden nur Funktionen

³⁴⁹ Siehe bspw. Abbildung 49

aussprechen, die auf der Ebene zwei und vor allem Ebene drei einzuordnen sind. Somit zeigen sich Funktionenbäume mit drei Hierarchieebenen und fünf Funktionen auf der dritten Ebene am häufigsten. Nur ein Proband erstellte einen Funktionenbaum mit vier Ebenen (Abbildung 57).

6.2.5 Vollständigkeit und Aufbau der Funktionsstrukturen

Auf den ersten Blick sehen die Funktionenbäume der Probanden sehr unterschiedlich aus. Jedoch gibt es Funktionen, die sich in jeder Analyse wiederfinden. Es gibt auch Funktionen, die kein Proband herausgearbeitet hat.

Um Aussagen über die Vollständigkeit der Funktionenbäume zu erhalten, wurden die einzelnen Datensätze mit dem Vergleichsmodell (Abschnitt 6 und Anhang) verglichen. Hierzu wurden auf der x-Achse von Abbildung 58 alle Funktionen des Vergleichsmodells und auf der y-Achse die Anzahl der Probanden eingetragen. Die aufgeschrieben und ausgesprochen sind unterschiedlich markiert. Die Nummerierung auf der x-Achse entspricht der Hierarchie des Vergleichsmodells.

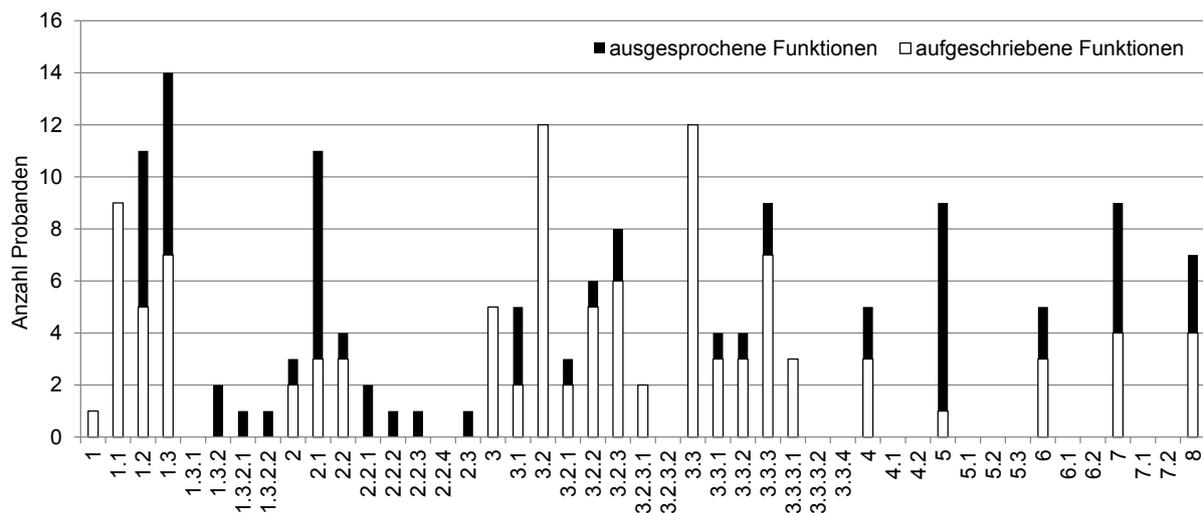


Abbildung 58: Vergleich mit dem Vergleichsmodell

Fast alle Probanden haben Funktionen zur Beschreibung des Pumpenmechanismus aufgeschrieben. 5 Probanden schrieben Funktionen auf, die der Teilfunktion 3 *Öl pumpen* ähnlich sind. 12 andere Probanden unterteilten die Funktionen des Pumpenmechanismus in zwei Teilfunktionen (3.2 = *Öl ansaugen* und 3.3 = *Öl abgeben*). 10 Probanden schrieben das Leiten des *Drehmomentes auf die Kolben* (1.1) auf. Das *Leiten des Drehmomentes auf den Zylinder* (1.2) und die Funktion *Lagerung der Welle* (1.3) wurden ebenfalls oft genannt, wobei nicht alle Probanden diese auch aufschrieben.

Drei weitere oft genannte Funktionen sind *Führung des Zylinders* (2.1), *Funktion des Gehäuses* (5) und *Schmierung der Pumpe* (7). Diese Funktionen wurden von den meisten Probanden ausgesprochen, jedoch nicht als aufschreibenswert befunden.

Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die Probanden die Pumpe nur in den Bereichen des *Pumpmechanismus* (3.2.1-3.2.3) und der *Dichtung der Druck- und Saugkammer* (3.3.1-3.3.3) detailliert untersuchten. Im Gegensatz hierzu wurden *Lagerung der Welle* (1.3.2) und *Funktion des Mittelzapfens* (2.2) oft vernachlässigt und nur von wenigen Probanden detailliert analysiert.

6.2.6 Anordnung der Funktionenbäume

Mehr als die Hälfte der Probanden ordneten die Funktionen in Analogie zum Kraftfluss durch das System an. Obwohl nur 7 Probanden diese Vorgehensweise bei der Analyse erkennen ließen, ordneten 11 Probanden die Funktionen der Antriebseinheit mit Welle und Lagerung auf der linken Seite des Funktionenbaums und rechts daneben den Pumpenmechanismus an. Abbildung 59 zeigt dies in einem aufgearbeiteten Funktionenbaum.

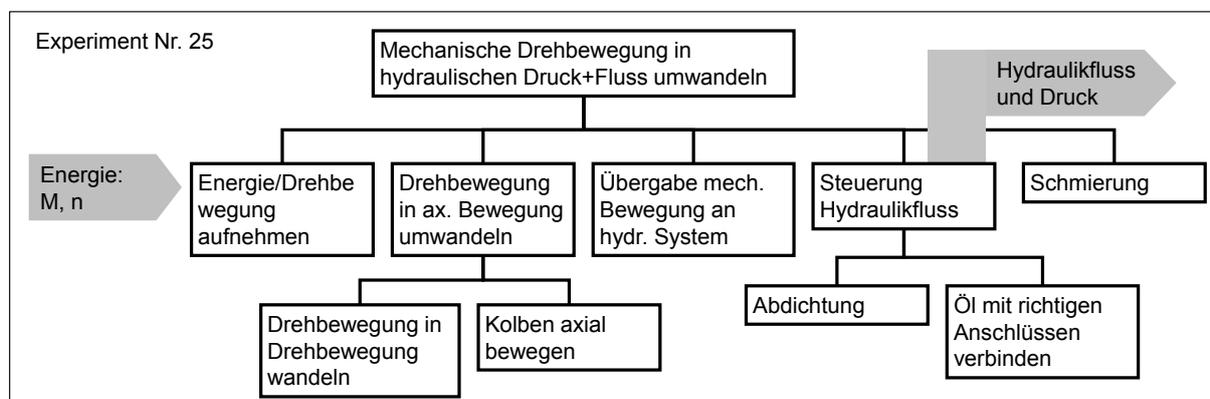


Abbildung 59: Funktionenbaum mit Originalanordnung von Proband Nr. 25

Die Abbildung zeigt, dass der Fluss von Drehmoment und Drehzahl durch den Funktionenbaum von links nach rechts zu verfolgen ist, jedoch wird die Schmierung auf der rechten Seite mit etwas Abstand angeordnet. Die Schmierung ist nicht mehr Teil des Kraftflusses. Es zeigt sich so sehr deutlich, dass die Auffassung von Funktion als Kraftfluss sehr nützlich ist, dass jedoch für die Bestimmung der Schmierung eine andere Auffassung gewählt werden musste. Die Anordnung der Funktionen korrespondiert mit der Ausrichtung von sowohl physischem Modell der Pumpe, als auch Zeichnung. Beide Modelle wurden aufgrund ihrer Merkmale immer nur in dieser Richtung betrachtet.

4 Probanden ordneten die Funktionen, die sie für wichtig hielten eher auf der linken und oberen Seite im Funktionenbaum an. Diese Probanden waren opportunistisch vorgegangen. 7 Probanden bezeichneten Schmierung und Dichtung als Nebenfunktionen, die von anderer Art seien als die Teilfunktionen, die unmittelbar zur Hauptfunktion beitragen. Diese Funktionen werden benötigt, um andere Funktionen *aufrechtzuerhalten* und ungewollte Funktionen, wie beispielsweise *Reibung* zu

vermeiden. Diese Funktionen wurden immer auf der rechten Seite oder eher unten in den Funktionenbäumen angeordnet.

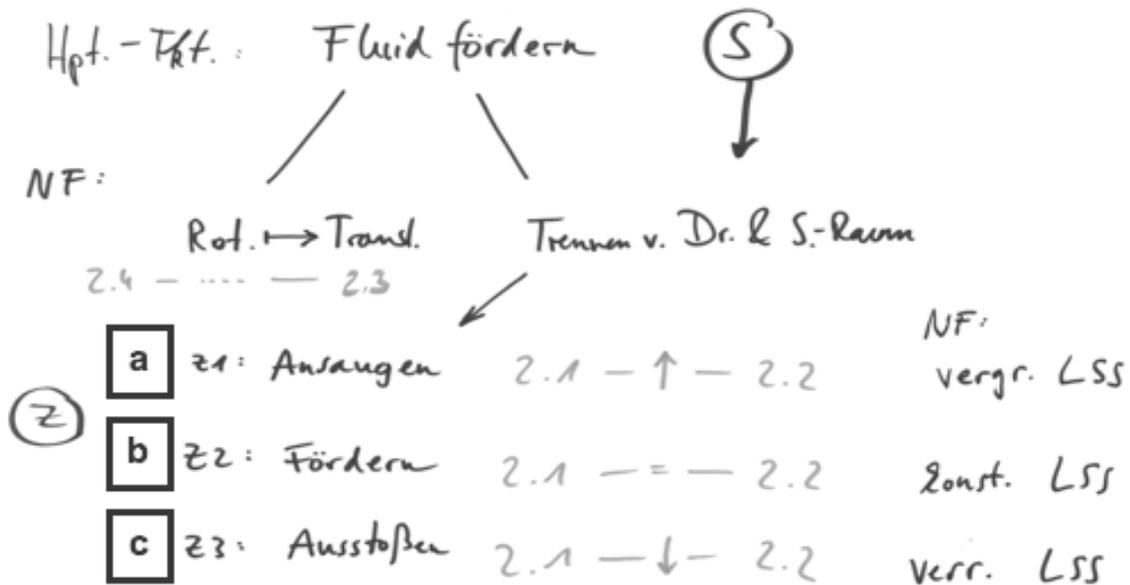


Abbildung 60: Zeitliche Unterteilung der Funktionen Proband Nr. 6

4 Probanden unterteilten den Pumpmechanismus zeitlich in einem Sequenzmodell, das die Funktionen als eine zeitliche Abfolge von Funktionszuständen beschreibt. Dieses Sequenzmodell wurde der Anleitung von ALBERS³⁵⁰ entsprechend aufgebaut. Abbildung 60 zeigt die Unterteilung in zeitlich nacheinander stattfindende, als einzelnes Verb formulierte Funktionen *ansaugen* (a), *weiterfördern* (b) und *ausstoßen* (c).

³⁵⁰ (Albers, et al., 2008b)

6.3 Einfluss der Vorgehensweise auf die Verwendung von Funktion

In diesem Abschnitt werden diejenigen Ergebnisse der Auswertung des Experimentes beschrieben, die einen Einfluss der Vorgehensweise der Probanden auf die Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion aufweisen. Zunächst wird eine Übersicht über die beobachteten Vorgehensweisen gegeben. Anschließend wird aufgezeigt, auf welchen unterschiedlichen Abstraktionsebenen die Probanden die Funktionen formuliert haben, worauf die Vorgehensweisen mit dem zeitlichen Ablauf der Anwendung von unterschiedlichen Abstraktionsebenen verglichen werden.

6.3.1 Unterschiedliche Vorgehensweisen

Bei der Analyse der Pumpe wählten die Probanden bewusst oder unbewusst eine bestimmte Vorgehensweise. Bei der Auswertung wurden vier unterschiedliche Vorgehensweisen beobachtet, die nachfolgend beschrieben werden.

Top-down Vorgehensweise

Die Top-down Vorgehensweise begann mit der Bestimmung der Gesamtsituation, also mit der Bestimmung der Hauptfunktionen und der Betrachtung des Gesamtsystems. Von der übergeordneten Funktion wurden schrittweise alle Funktionen auf der nächsten Ebene ermittelt, worauf für jede dieser Funktionen wiederum die untergeordneten Funktionen gesucht wurden. Die Funktionen auf einer Ebene wurden also möglichst vollständig bestimmt, worauf die Analyse an anderer Stelle vertieft wurde.

Das Wichtigste zuerst

Probanden fokussierten hierbei direkt auf ein bestimmtes Teilsystem des Produktes. Die Entscheidung, warum auf dieses Teilsystem fokussiert wurde, scheint hierbei rein subjektiv und blieb für die Auswertung des Experimentes verborgen. Diese Vorgehensweise wurde also nicht bewusst gewählt.

Opportunistische Vorgehensweise

Nachdem die Probanden sich einen Überblick über das System erarbeitet hatten, begannen die sie ein bestimmtes Teilsystem vertieft zu analysieren. Nach der Klärung dieses Sachverhaltes oder nach dem Abbruch der vertieften Betrachtung fokussierten die Probanden das nächste „interessante“ Teilsystem. Die Wechsel waren auch hier subjektiv und das Vorgehen nicht bewusst gewählt.

Vorgehensweise orientiert am Kraftfluss durch das System

Hierbei analysierten die Probanden das System entlang des Kraftflusses. Alle Probanden erkannten, dass der Kraftfluss durch die Pumpe bei der Keilwelle in Form einer Drehbewegung in das System eintritt und in Form von hydraulischer Energie aus dem System wieder austritt³⁵¹. Die Unterteilung in Teilsysteme entlang des Kraftflusses wurde jedoch unterschiedlich detailliert vorgenommen.

Abbildung 61 zeigt die Anzahl der Probanden, die der jeweiligen Vorgehensweise zugeordnet werden konnten. Ebenso wird zwischen Probanden mit Zeichnung und physischem Modell unterschieden.

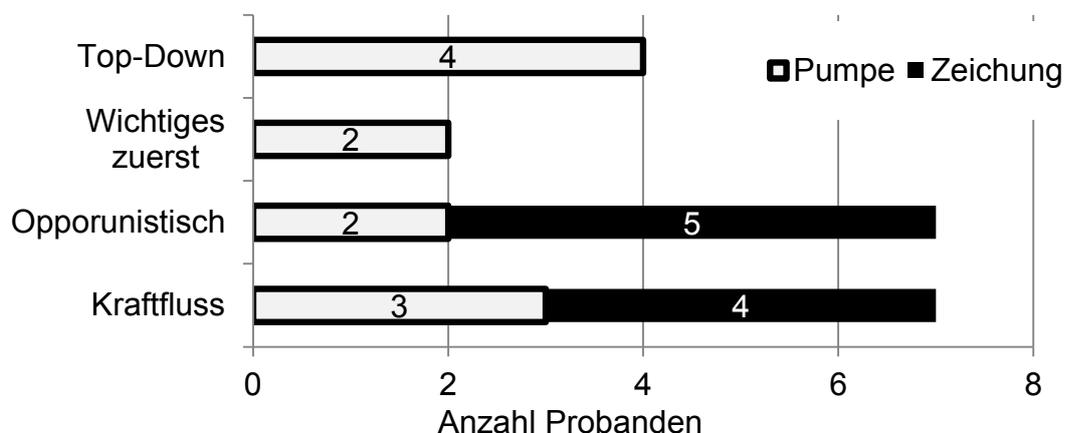


Abbildung 61: Anzahl der Probanden für die jeweilige Vorgehensweise

6.3.1.1 Vorgehensweise und Funktionen

Abbildung 62 zeigt die Anzahl der ermittelten Funktionen bezogen auf die Vorgehensweise. 4 Probanden analysierten Top-Down und erzeugten hiermit die meisten Funktionen, aber auch die größte Streuung bei sowohl aufgeschriebenen als auch ausgesprochenen Funktionen.

Die *Wichtigstes zuerst* Vorgehensweise hat die kleinste Bandbreite. Die beiden Probanden generierten sehr ähnliche Funktionenbäume. Probanden, die dem Kraftfluss folgten, sprachen etwa gleich viele Funktionen aus, wie sie aufschrieben. Im Gegensatz hierzu schrieben die Probanden mit der *opportunistischen Vorgehensweise* am meisten ausgesprochene Funktionen auf.

Abbildung 63 zeigt die durchschnittliche Anzahl an Hierarchiestufen, die über der durchschnittlichen maximalen Anzahl der Funktionen auf einer Ebene aufgetragen sind. Hier wird deutlich, dass die Probanden mit einer Top-down Vorgehensweise

³⁵¹ Siehe Abschnitt 6.1.1, S. 117

nicht nur die meisten Funktionen analysierten, sondern auch die detailliertesten Funktionenbäume erstellen.

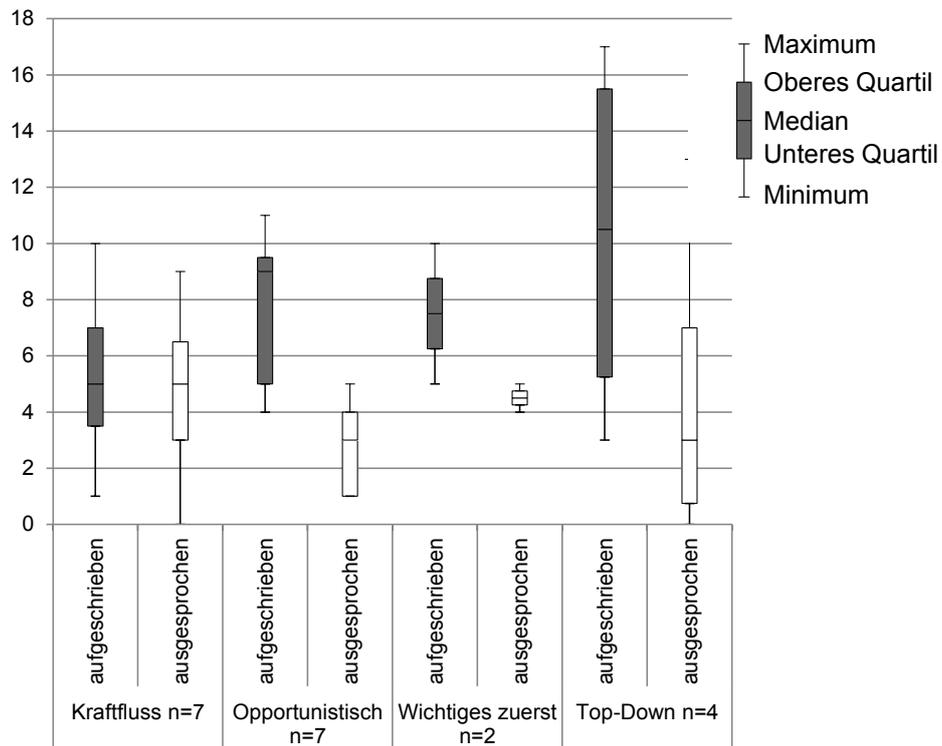


Abbildung 62: Quantitative Werte für die Anzahl von Funktionen – Vorgehensweisen

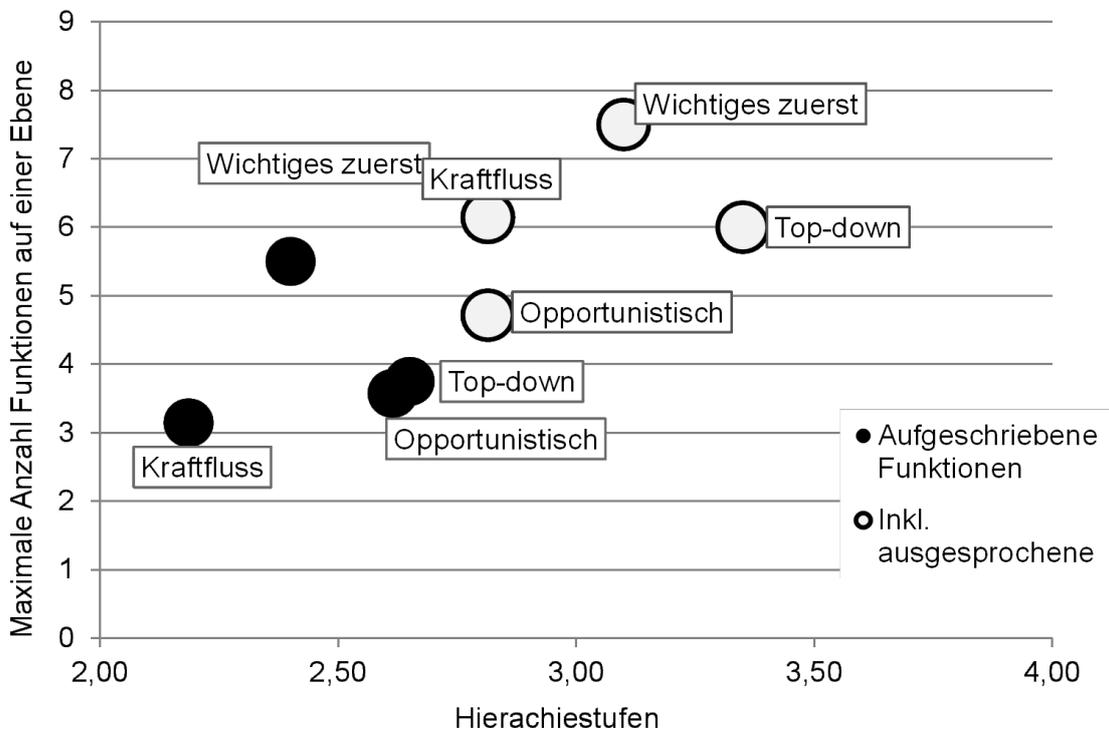


Abbildung 63: Steilheit der Funktionenbäume und verschiedene Vorgehensweisen

6.3.2 Strukturierung von Funktionen

In Funktionenbäumen werden Funktionen gemäß ihrer Hierarchie³⁵² strukturiert. Bei den Probanden konnten zwei weitere zu unterscheidende Vorgehensweisen beobachtet werden:

- Funktion-orientierte Vorgehensweise: Zunächst werden hierbei die Hauptfunktionen und die dazu beitragenden Teilfunktionen ermittelt, ohne dass diese direkt auf die Gestalt bezogen werden. Dies sind in der Regel Funktionen, von denen der Proband annimmt, dass sie von System erfüllt werden müssen. Im nächsten Schritt wurden dann Funktionen der Gestalt zugeordnet.
- Komponenten-orientierte Vorgehensweise: Zunächst sehen sich die Probanden die Komponenten oder Baugruppen an und beschreiben erst dann auf Basis der Geometrie die Funktion. Die Komponenten werden identifiziert und daraufhin in eine hierarchische Struktur gebracht.

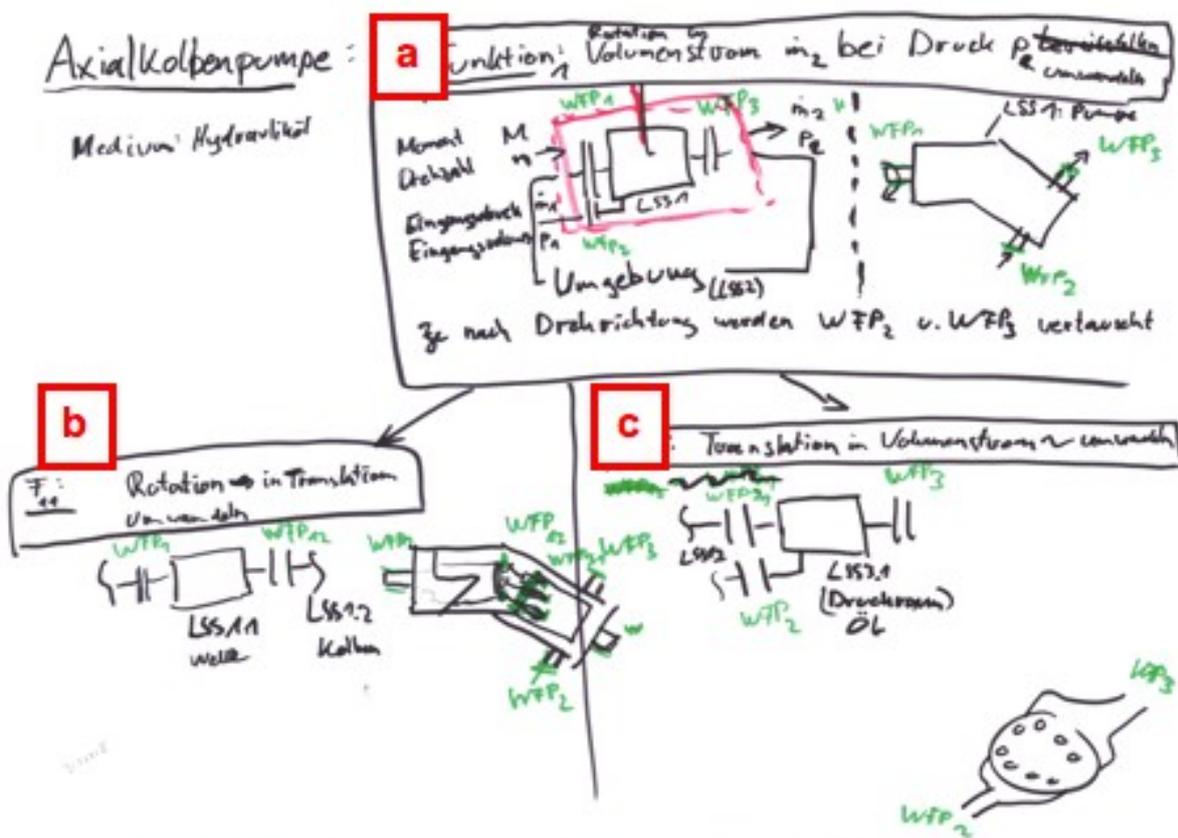


Abbildung 64: Darstellung der Funktionen im C&C-Modell von Proband Nr.31

Fast alle Probanden strukturierten die Funktionen zu Beginn funktionsorientiert³⁵³. Diese sind meist die Hauptfunktion und eine oder zwei Teilfunktionen auf der

³⁵² Abschnitt 2.3.3, S. 27

obersten Ebene. Proband Nr. 31 benennt die Teilfunktion *Rotation in Translation umwandeln* (b in Abbildung 64) und *Translation in Volumenstrom umwandeln*, die aus der Unterteilung der Hauptfunktion *Rotation in Volumenstrom mit Druck umwandeln* (a) resultieren.

Auf den ersten Blick sieht diese Unterteilung und auch die darauf folgende Zuordnung der Funktionen zur entsprechenden Gestalt mit Hilfe von WFP und LSS sinnvoll aus. Jedoch bestimmte der Proband kein WFP, das die beiden Teilfunktionen in Bezug zueinander setzte. Der Proband suchte für jede Funktion unabhängig voneinander nach WFP und LSS. Die Funktion *Rotation in Translation umwandeln* (b) *endet* mit dem WFP zwischen Welle und Kolben, wobei die Funktion *Translation in Volumenstrom umwandeln* (c) mit dem WFP zwischen Kolbenende und Zylinder *beginnt*. Zu diesem Zeitpunkt war der Proband zufrieden und bemerkte nicht, dass die Kolben zu keiner Funktion beitragen. Die Kolben waren praktisch *zwischen* den beiden Funktionen. Er hätte also eine weitere Teilfunktion auf derselben Ebene einführen müssen oder die Kolben in eine der identifizierten Funktionen integrieren müssen, sodass sich ein logischer Zusammenhang der Funktionen ergibt.

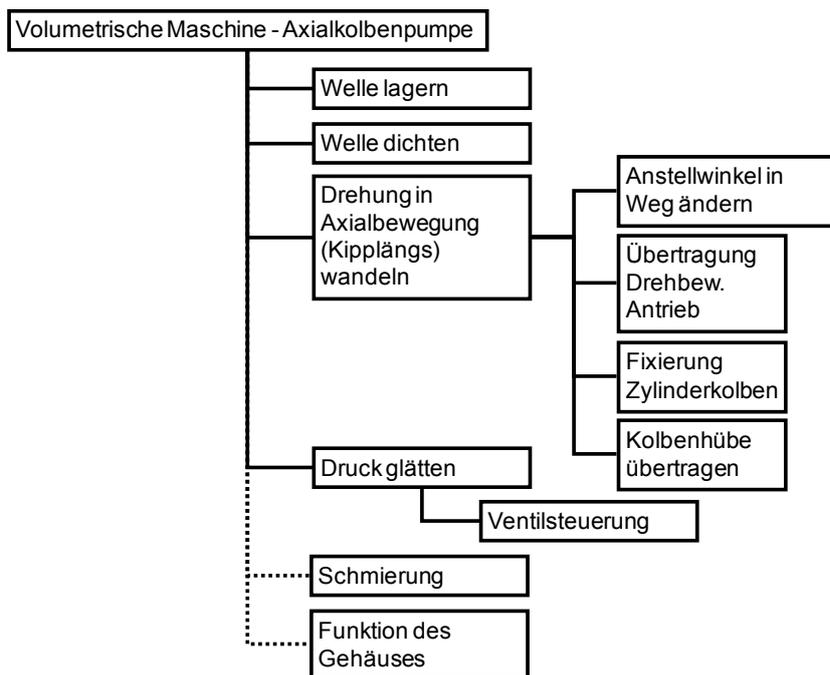


Abbildung 65: Ursprüngliche Strukturierung der Funktionen von Proband Nr. 8

Ein weiteres Problem wird bei der Analyse von Proband Nr. 8 deutlich. Dieser ging bei der Strukturierung der Funktionen Komponenten-orientiert vor. Er deckte viele

³⁵³ Zuerst die Frage stellen: Welche Funktionen werden vom System erfüllt, dann nachsehen wo diese Funktion erfüllt wird

Funktionen auf, ohne über die Gesamtstruktur nachzudenken. Als er vom Experimentator gebeten wurde die Funktionen in eine Baumstruktur zu bringen, geriet er in Schwierigkeiten. Abbildung 65 zeigt den entstandenen Funktionenbaum, der einige logische Fehler aufweist.

Der Proband ordnete einige Funktionen seitlich zueinander und einige übereinander an. Die untergeordneten Funktionen sind jedoch keine Teilfunktionen, die zur übergeordneten beitragen. Dieser Funktionenbaum enthält eigentlich keine hierarchische Strukturierung. Für die quantitative Auswertung wurde der Funktionenbaum neu angeordnet.

6.3.3 Funktionen und der Verlauf der Analyse

Der Verlauf gibt die Reihenfolge der Funktionsformulierung sowie der Zuordnung der Funktionen zu den jeweiligen Hierarchieebenen wieder³⁵⁴. Abbildung 66 zeigt den Verlauf von Proband Nr. 8.

Indem man die Verläufe der Experimente und zugeordnete Funktionen vergleicht, können Muster in den Experimenten identifiziert werden. In den meisten Fällen korreliert die Betrachtungsebene (Linie in Abbildung 66) mit der Ebene, auf der Funktionen formuliert werden (Dreiecke und Rauten in Abbildung 66).

6.3.3.1 Funktionen und Abstraktionsebenen

Fast kein Proband schrieb Funktionen auf Komponentenebene (Betrachtungsebene 1 in Abbildung 66) auf. Lediglich Proband Nr. 8 schrieb 3 Funktionen auf Komponentenebene auf. Auf dieser Ebene formulierte er beispielsweise *Zylinder mithilfe der Bewegung der Kolben antreiben*. Diese Art der Formulierung beinhaltet klare Information über die Komponenten und somit über die Funktion erfüllende Gestalt. Alle anderen Probanden sprachen die Funktionen auf dieser Ebene entweder nur aus oder analysierten nicht auf dieser Ebene.

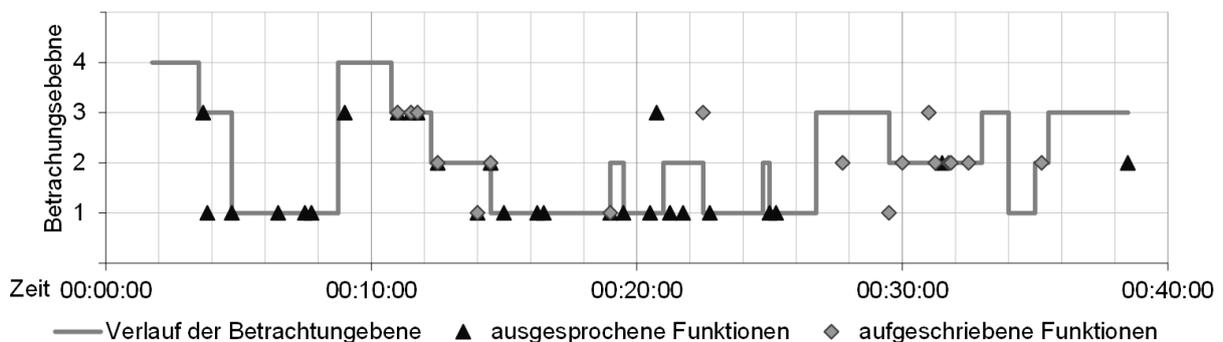


Abbildung 66: Verlauf mit Abstraktionsebenen und Funktionen (Proband Nr. 8)

³⁵⁴ Abschnitt 6.1.5, S.127

Die meisten der aufgeschriebenen Teilfunktionen wurden auf der Betrachtungsebene² formuliert. Die wenigen Funktionen, die auf dieser niedrigen Betrachtungsebene¹ aufgeschrieben wurden, sind in Abbildung 66 als Dreiecke ohne Raute zum selben Zeitpunkt dargestellt. Die ausgesprochenen Funktionen mit darüber liegender Raute waren schon aufgeschrieben oder wurden zu einem späteren Zeitpunkt aufgeschrieben. Im Moment als diese ausgesprochen wurden (Dreiecke), hat der Proband teilweise auch vergessen diese aufzuschreiben.

Meistens wurden Funktionen mehrfach genannt, weil noch einmal auf das sie erfüllende Teilsystem fokussiert wurde oder der Proband während des Aufschreibens die Funktionen ausgesprochen hat. Des Weiteren ist die höhere Anzahl an ausgesprochenen Funktionen auf die Umformulierung der Funktionen zurückzuführen.

Proband Nr. 11 schrieb in den ersten zwölf Minuten fünf Funktionen auf, jedoch sprach er viele weitere Funktionen aus, die alle den Ebenen 1 und 2 zuzuordnen sind (Abbildung 68). Zum Zeitpunkt als er Funktion und Gestalt zuordnete wurden die aufgeschriebenen Funktionen wiederholt, da der Proband die Funktionen der Gestalt zuordnete. Die nur ausgesprochenen Funktionen des Experiments von Proband Nr. 11 entsprechen den grau hinterlegten Funktionen im Funktionenbaum in Abbildung 67.

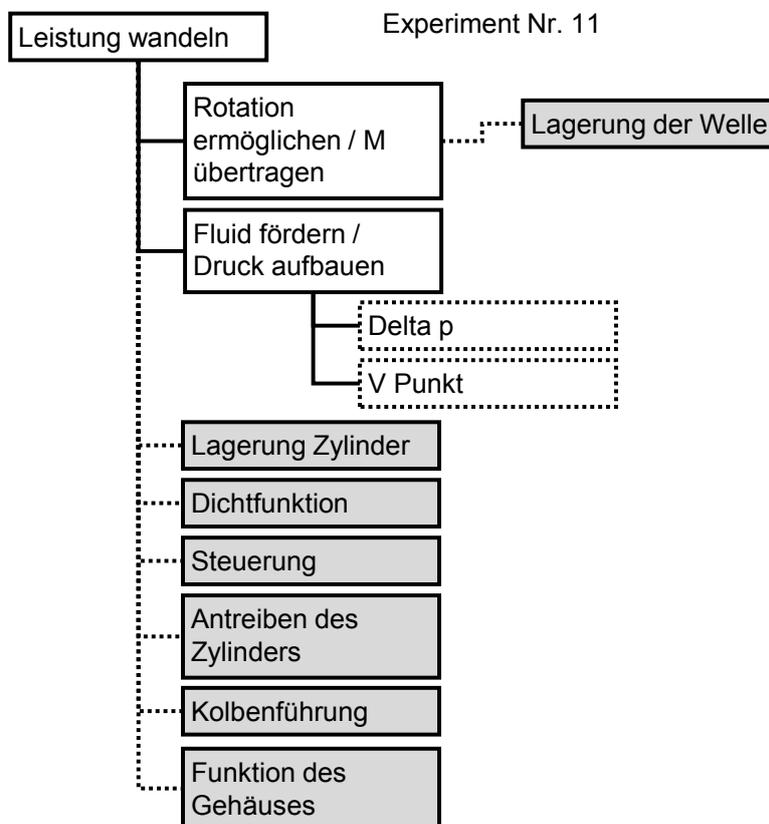


Abbildung 67: Funktionenbaum von Proband Nr. 11

Bei der Zuordnung der Funktionen auf den tiefen Betrachtungsebenen wurden in der Auswertung ähnliche Funktionen wie *Zylinder führen* und *Zylinder stützen* zusammengefasst. Der Proband hatte bei der Zuordnung einmal die Feder und zum anderen die gewölbte Fläche der Steuerplatte genauer untersucht. Deren Funktionen befinden sich zwar auf einer tieferen Hierarchieebene, da er aber keine übergeordnete Funktion genannt hatte, konnten diese auch nicht dementsprechend eingeordnet werden. Als Ausweichmöglichkeit wurde daher die zusammenfassende Funktion *Zylinder führen/stützen* gewählt³⁵⁵.

6.3.3.2 Zusammenhang von Anzahl der Funktionen und Verlauf

In der Auswertung der Experimente wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Anzahl der identifizierten Funktionen und dem Verlauf sichtbar. Probanden, die zu Beginn den Funktionenbaum erstellt haben und im Nachhinein versuchten die Funktionen der Gestalt zuzuordnen, arbeiteten nicht so viele Funktionen heraus, wie Probanden, die den Funktionenbaum auf die Gestalt bezogen. Proband Nr. 5 strukturierte (Abbildung 52) während der ersten 15 Minuten fünf Funktionen auf drei unterschiedlichen Hierarchiestufen. Der Proband gruppierte dabei die Funktionen entsprechend dem Fluss von Material, Energie und Information. Nachdem er die Funktionen der Gestalt zugeordnet hatte, analysierte er denjenigen Teil der Pumpe, dessen Funktion er nicht erkannte. Während dieser fokussierten Analyse entdeckte er weitere Funktionen auf der Ebene der Komponenten, die er jedoch nicht in seinem zuvor erstellten Funktionenbaum eingliederte. Es scheint, dass er die Strukturierung der Funktionen zuvor bereits abgeschlossen hatte. Dasselbe Vorgehen ist bei Proband Nr. 11 zu erkennen (Abbildung 68).

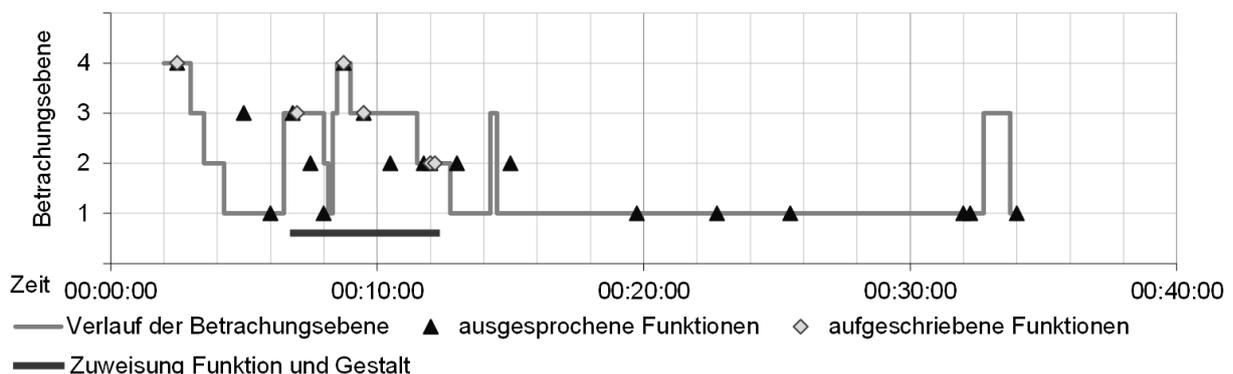


Abbildung 68: Verlauf und Funktionen von Proband Nr. 11

³⁵⁵ Die Auswertung wurde operativ von der Diplomandin Anne Ruckpaul durchgeführt

Proband Nr. 11 schrieb die Funktionen zu Beginn auf und ordnete sie in der Zeichnung den Komponenten zu. Der Funktionenbaum war für ihn zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen und er fuhr fort, ohne weitere Funktionen aufzuschreiben.

In Abbildung 68 ist ebenfalls zu erkennen, dass Proband Nr.11 die aufgeschriebenen Funktionen vorrangig auf übergeordneten Ebenen und die ausgesprochenen Funktionen vorrangig auf Komponentenebene zu finden sind.

6.3.4 Zeitpunkt, zu dem ein System als verstanden gilt

Viele Probanden betrachteten von sich aus die Analyse als abgeschlossen, obwohl noch Zeit zur Verfügung stand die Analyse weiter zu vertiefen. In dieser Situation stellte die Experimentatorin den Probanden Fragen zu Baugruppen oder Komponenten, die noch nicht oder nur oberflächlich betrachtet worden waren. Auf der anderen Seite behaupteten Probanden, dass man das System niemals vollständig verstehen kann, da dies die Kenntnis aller Details erfordern würde. Dieser Sachverhalt zeigt, dass der Zeitpunkt, zu dem ein Proband behauptet Systemverständnis erlangt zu haben, subjektiv ist.

6.4 Funktion und Gestalt zuordnen mit dem C&C-Ansatz

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Auswertung beschrieben, die zeigen, wie Funktion und Gestalt mit dem C&C-Ansatz zugeordnet wurden.

6.4.1 Darstellung von C&C-Modellen

Die Zuordnung von Funktion und Gestalt eines technischen Systems sollte gemäß des C&C-Ansatzes mit Hilfe von WFP und LSS durchgeführt werden. Die WFP und LSS werden sowohl der Funktion als auch der Gestalt zugeordnet, sodass die Zuordnung möglichst eindeutig ist.

Der Hauptunterschied zwischen den Probanden mit Zeichnung und Probanden mit physischem Modell ist, dass die Probanden mit dem physischen Modell selbst Zeichnungen anfertigten, während die Probanden mit Zeichnung WFP und LSS direkt in die zur Verfügung gestellte Zeichnung eintragen konnten. Sechs der elf Probanden zeichneten Skizzen, die Teile der Geometrie darstellen, worauf die WFP und LSS für die Funktionen eingezeichnet werden konnten. Drei Probanden zeichneten schematische Darstellungen³⁵⁶ (beispielsweise Abbildung 70), die WFP und LSS repräsentieren sollten, die jedoch nicht auf die Geometrie der Pumpe schließen lässt. Eine Ausnahme hierbei ist die Andeutung der Schrägachse. Zwei

³⁵⁶ Eine gezeichnete Struktur von WFP und LSS, die jedoch im Gegensatz zur Skizze sehr wenig Information über die Gestalt beinhaltet.

Probanden zeichneten gar nicht. Fast alle Probanden, die eine schematische Darstellung oder keine Skizze anfertigten, stellten keinen expliziten Bezug von Funktion und Gestalt mittels WFP und LSS her. Nur ein Proband tat dies (Abbildung 70). Er benannte die „Bauteile der LSS“ und zeichnete WFP als Verbindungen zwischen den Bauteilen ein. Des Weiteren zeichnete ein Proband eine Skizze der Pumpe und trug die WFP und LSS ein, brachte jedoch Funktionen nicht mit diesen in Verbindung. Fast alle mit dem physischen Modell der Pumpe arbeitenden Probanden ordneten Funktion und Gestalt mit Hilfe von WFP und LSS zu. Proband Nr. 9 (Abbildung 48) fertigte Zeichnungen des Pumpmechanismus an, zeichnete jedoch keine WFP und LSS ein, um die Funktionen der Gestalt zuzuordnen.

Proband Nr. 9 wies ein einzelnes WFP, zwischen Kugelkopf und Mittelzapfen, einer einzelnen Funktion *Revolver unterstützen* zu. Proband Nr. 2 (Abbildung 69) und Proband Nr. 8 verwendeten eine Boxdarstellung für die Funktionen und verwendeten damit die Lehrdarstellung des C&C-M in Maschinenkonstruktionslehre an der Universität Karlsruhe. Diese Boxdarstellung für die Funktionen wurde von den Probanden mit Skizzen kombiniert auf denen jeweils die, für die Funktion relevanten WFP und LSS eingezeichnet sind. Abbildung 69 zeigt, dass eine große Box (a) für die Hauptfunktion vorgesehen ist, in deren Innerem (b) kleinere Boxen für die hierarchisch untergeordneten Funktionen vorgesehen sind. Auf der rechten Seite neben der Boxdarstellung ist die zugeordnete Skizze dargestellt (c). Auch in der Skizze zeichnete der Proband die WFP in roter Farbe ein und benannte diese entsprechend der Nummerierung in der Box. In der großen Box für die Hauptfunktion ist eine Zeile für die Benennung der LSS vorgesehen in deren rechts davon stehenden Klammer diejenigen Bauteile aufgelistet sind in der die Leitstützstruktur liegt.

Für einige WFP ordnete der Proband Informationen über die Input und Output Parameter des Systems zu (d).

Von den neun Probanden, die mit dem physischen Modell der Pumpe arbeiteten, haben drei Probanden keine WFP und LSS auf der Zeichnung markiert und somit auch keine Funktionen expliziert. Drei der Probanden markierten WFP und 3 Probanden markierten WFP und LSS in der Zeichnung. Die Zuordnung von Funktion und Gestalt wurde also eher mithilfe der WFP, ohne LSS durchgeführt. Nur ein Proband verwendete auch LSS für die Zuordnung. Ein anderer Proband unterteilte die Pumpe in Teilsysteme, nummerierte diese und wies diese Funktionen im Funktionenbaum zu.

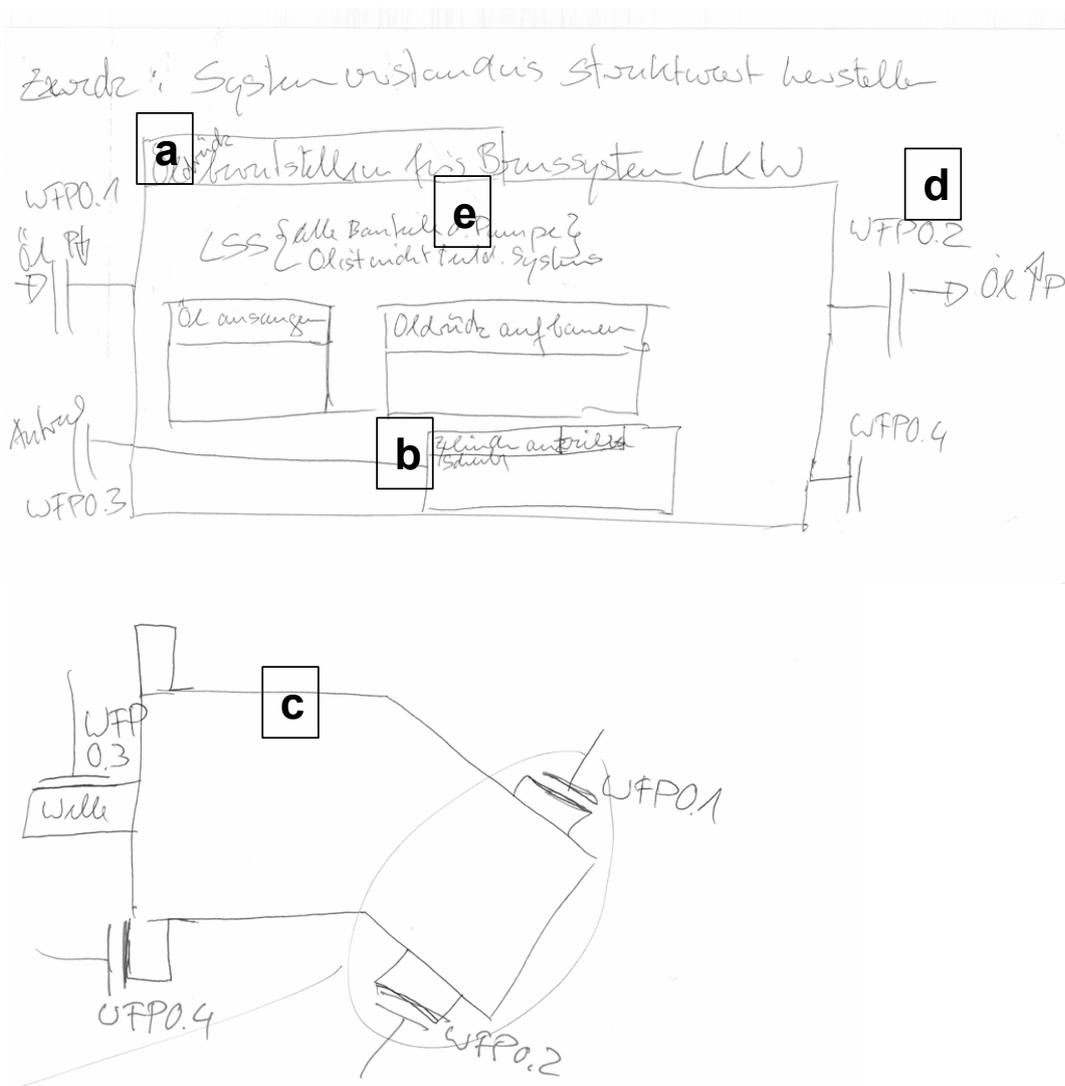


Abbildung 69: C&C-M Boxdarstellung von Proband Nr. 2

Acht Probanden nummerierten die WFP und LSS, wohingegen fünf Probanden die WFP gemäß den Bauteilen benannten, zwischen denen sie sich befinden. Abbildung 53 auf Seite 132 zeigt die schematische Darstellung eines von zwei Probanden, die WFP und LSS in der Zeichnung markiert haben. Die Teilfunktionen (b) sind ebenfalls in der großen Box (a) eingeordnet, jedoch sind nur WFP markiert.

6.4.2 Verständnis der Anwendung des C&C-M

Das Verständnis für den Zweck des C&C-Ansatzes variiert ebenfalls stark. Von den 8 Probanden in der detaillierten Analyse haben 3 den in der Literatur beschriebenen C&C-Ansatz verwendet. Dies bedeutet, dass C&C-M verwendet wird, um Funktion und Gestalt mit Hilfe von WFP und LSS gemeinsam abzubilden. Diese Probanden wendeten den C&C-Ansatz im Experiment für alle aufgeschriebenen Funktionen an. 3 der 8 Probanden in der Detailanalyse verwendeten C&C-M verbal zur Beschreibung von Funktionen. Sie argumentierten mit Hilfe von WFP und LSS, jedoch nahmen sie keine klare Zuordnung zu Funktionen auf dem Papier vor. Im

verbalen Gebrauch wurde der C&C-Ansatz vorrangig auf der tiefsten Betrachtungsebene der Komponenten angewandt. Die Probanden markierten die WFP in der Zeichnung und in bereits angefertigten Skizzen, während die LSS vergleichsweise selten markiert wurde. Diese markierten WFP und LSS wurden selten den Funktionen im Funktionenbaum zugeordnet. Mithilfe des C&C-Ansatzes wurden eher Effekte zwischen den Komponenten beschrieben.

Beispielsweise schloss Proband Nr. 13 die Beschreibung der Gestalt aus seinem C&C-Modell aus. Abbildung 70 zeigt „das C&C-Modell der Pumpe“, das vom Probanden als abstrahierte, schematische Darstellung der Komponenten der Pumpe aufgefasst wird. Dort, wo die mit Schlangenlinien abstrahierten LSS (Bauteile) mit dem benachbarten Teilsystem interagieren, finden sich als Doppellinien dargestellte WFP.

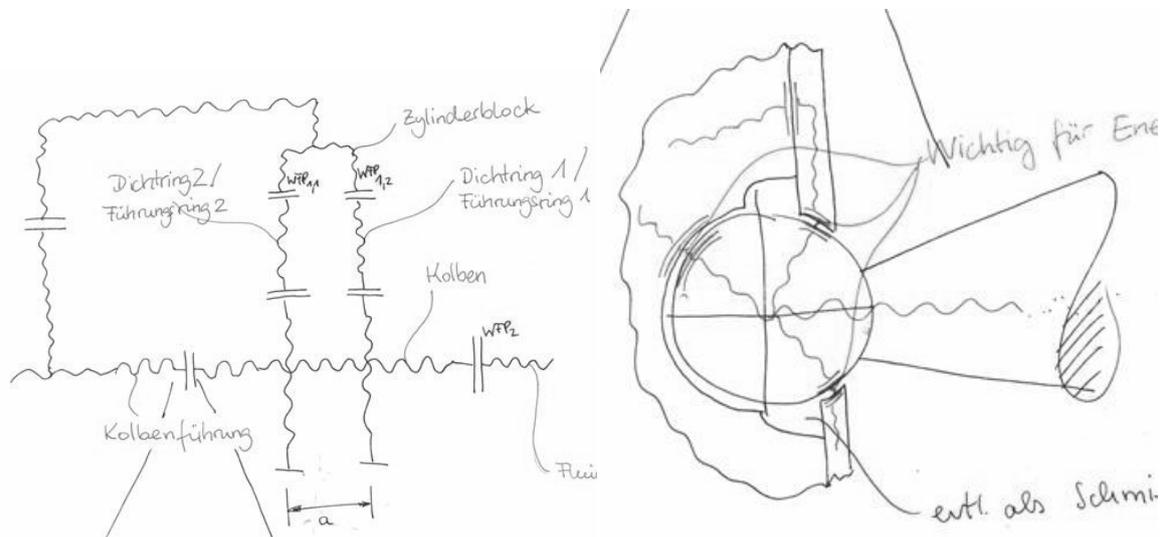


Abbildung 70: C&C-M Modell von Proband Nr. 13

Diese abstrakte Darstellung wurde vom Probanden so lange erweitert, bis er nicht mehr in der Lage war, die Übersicht zu behalten und er sich gleichzeitig unbekannte Funktionen der Pumpe erarbeiten musste. Die abstrakte, schematische Darstellung war also eine Repräsentation dessen, was der Proband sich bereits erarbeitet hatte. Zum Zeitpunkt, als er gezwungen war, sich weitere an diese Darstellung anzugliedernde Details zu erarbeiten, musste er sich „die Gestalt hinter das C&C-Modell legen“. Abbildung 70 zeigt wie er sich so die Funktionen im Bereich der Kolbenköpfe und der Rückzugsplatten erarbeitete. Er sagte, dass es „für das Verständnis sehr hilfreich ist, die Gestalt heranzuziehen“ und dass es ein guter Tipp wäre, das „C&C-M zusammen mit der Gestalt zu verwenden“. Im Verständnis des Probanden ist also ein C&C-Modell eine stark abstrahierte, schematische Darstellung der Gestalt (Abbildung 70-oben), die auf einer prinzipiellen Ebene die Zusammenhänge der Bauteile wiedergibt. Dies ist ein falsches Verständnis.

6.4.3 Probleme bei der Anwendung des C&C-Ansatzes

Einige Probanden hatten Probleme, die Funktionen der Gestalt mithilfe des C&C-Ansatzes zuzuordnen. Dies war immer der Fall, wenn Funktionen vorab aufgeschrieben wurden und im Nachhinein versucht wurde, diese der Gestalt zuzuordnen. Zum einen konnten die Probanden sich einfach nicht mehr daran erinnern, an welchem Ort sie die Funktion zugeordnet hatten oder sie gerieten in Schwierigkeiten, weil sie die Funktionen ohne Bezug zu einer Komponente formuliert hatten.

Einige Probanden waren sehr unsicher im Umgang mit den Definitionen des C&C-Ansatzes. Dies deutet darauf hin, dass die Anwender durch die Fixierung auf die beschriebenen Konventionen der Darstellung und Formulierung von Funktion die Grundhypothesen des C&C-Ansatzes infrage stellen.

Des Weiteren hatten einige Probanden Schwierigkeiten bei der Darstellung der Dynamik im System. Diese zeigte sich z. B. bei dem rotierenden Zylinder, der mit der *Vor- und Rückbewegung der Kolben* einhergeht. Andere Probanden verwendeten das Sequenzmodell, um parallel oder nacheinander ablaufende Funktionen im C&C-M darzustellen.

6.5 Unspezifische Faktoren im C&C-Ansatz

Auch im Experiment traten C&C-Ansatz unspezifische Faktoren auf, die Hindernis für effektives und effizientes Vorgehen sein können. Diese Faktoren können den Grundlagen methodischen Vorgehens zugeordnet werden³⁵⁷. Die beiden nachfolgend aufgelisteten Punkte konnten sehr gut im Experiment beobachtet werden. Jedoch waren auch die bereits in Abschnitt 5.5 angeführten Punkte zu beobachten.

6.5.1 Vorgehen im Sinne der klassischen Konstruktionsmethodik

Die klassische deutsche Konstruktionsmethodik vernachlässigt die Analyse und die Berücksichtigung bestehender Teile eines Systems in den Entwicklungsprozess. Gerade in Bezug auf Funktion werden die Schwierigkeiten bei der Aufstellung von Funktionsstrukturen vernachlässigt³⁵⁸. Die Bedeutung von Funktion wird in der klassischen Konstruktionsmethodik vorrangig in den Kontext der Lösungssuche gestellt. Diese Vorgehensweise scheint bei Probanden zum Teil stark verankert zu sein. Hiermit geht einher, dass Funktionen sehr abstrakt und lösungsneutral

³⁵⁷ Siehe Abschnitt 5.5 und 2.2.4

³⁵⁸ Ausführlich dargestellt in Abschnitt 2.3.5.1, Seite 34

formuliert werden. Wird in der Analyse dann versucht, die Funktionen direkt abstrakt, ohne Bezug zur Gestalt zu formulieren, was dann oft zu Schwierigkeiten führt.

6.5.2 Aufgeben der Systematik – Vorfixierung

Das Aufgeben der vorab gewählten Methode, das Übergehen zu Spekulation, Springen an andere Stellen oder das starke Vertiefen einhergehend mit dem außer Acht lassen anderer möglicher Zusammenhänge, lassen die Probanden oftmals die Struktur und die Übersicht über die Abfolge der Analyse verlieren. Resultat der zu starken Vertiefung auf Teilaspekte sind Lösungsvorschläge für diesen einen fokussierten Bereich.

Hierbei muss zwischen zwei Gruppen von Probanden unterschieden werden: Zum einen gibt es Probanden, die zu Beginn bewusst eine Systematik wählten und sich durch ein bestimmtes Ereignis von dieser Systematik abbringen lassen. Zum anderen gibt es Probanden, die zu Beginn nicht explizit eine Systematik gewählt haben und sich auch durch auftretende Ereignisse durch die Analyse leiten ließen.

In beiden Fällen waren diese Ereignisse Fragen des Experimentators oder die eigenbestimmte Aufdeckung von Widersprüchen.

7 Anforderungen für die Verwendung von Funktion im C&C-Ansatz

In diesem Kapitel werden Schlussfolgerungen aus der Auswertung der Projekte in Kapitel 5 und der Auswertung des Experimentes in Kapitel 6 gezogen. Ziel dieser Schlussfolgerungen und damit der vorliegenden Arbeit ist es, methodische Unterstützung beim Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz bereitzustellen. Methodische Unterstützung heißt in diesem Falle, Handlungsvorschläge zu formulieren, die eine Zielerreichung des Lösens von Gestaltungsproblemen sicherer werden lassen (siehe Abschnitt 2.1.1, Seite 8). Hierzu werden die vier Themenbereiche der Forschungsfragen in diesem Kapitel so aufgearbeitet, dass Anforderungen und Definitionen für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz deutlich werden. Diese Anforderungen und Definitionen werden in Kapitel 8 wieder in den Kontext der zugrunde gelegten Vorgehensweise³⁵⁹ überführt. Dort werden die Handlungsanweisungen formuliert. Als Überblick werden hier zunächst die Forschungsfragen aufgegriffen und deren Beantwortung kurz zusammengefasst. Anschließend werden die einzelnen Bereiche vertieft erklärt.

- **HP1: Die Verwendung von Funktionen ist für das Lösen von Gestaltungsproblemen von großer Bedeutung, jedoch geschieht dies nur intuitiv:** In Projekten und Experiment wurde die Hypothese bestätigt: Für unterschiedliche Aktivitäten werden unterschiedliche Auffassungen von Funktionen benötigt. Mit der Verwendung unterschiedlicher Auffassungen kann ein Fortschritt sowohl in Analyse als auch Synthese besser erreicht werden. Das Kernproblem bei der Anwendung ist, dass die Projektbearbeiter und die Probanden des Experimentes ihre Auffassung von Funktion entweder an einer einzelnen, beschränkten Bedeutung oder einer Konvention zur Darstellung oder Formulierung festmachen. Die unterschiedlichen Auffassungen von Funktion durchmischen sich in der Anwendung. Deshalb sollte ein Konzept von Funktion zwischen unterschiedlichen Bedeutungen aber auch zwischen Darstellung und Formulierung unterscheiden. Übergeordnet sollte Funktion als Interaktion benachbarter Systeme aufgefasst werden

³⁵⁹ Siehe Abschnitt 2.4.3, S. 52ff

- **HP2: Beim Lösen von Gestaltungsproblemen müssen unterschiedliche Vorgehensweisen zugelassen werden. Hierbei sind unterschiedliche Bedeutungen von Funktion notwendig:** Die Vorgehensweise für das Lösen eines spezifischen Problems bestimmt die benötigten Bedeutungen von Funktionen. Je nach Ziel des Vorgangs³⁶⁰ werden unterschiedliche Bedeutungen, Darstellung und Formulierung von Funktionen (Konzept von Funktion) benötigt, die aufeinander aufbauen und jeweils unterschiedliche Perspektiven auf das Problem geben. Somit ist diese Hypothese bestätigt.
- **HP3: Die aktuellen Grundhypothesen des C&C-Ansatzes sind in Bezug auf die Funktion zu allgemein formuliert:** Weitere Anforderungen an das in den C&C-Ansatz bereits eingeführte Konzept von Funktion besteht in einer differenzierten Betrachtung von Funktion. Je nach Aktivität werden Funktionen und Gestalt mithilfe der WFP und LSS auf andere Art und Weise angeordnet und strukturiert. Ziele können nicht mit dem C&C-Ansatz beschrieben werden. Effekte, die bisher als Funktion bezeichnet wurden, werden einzelnen WFP und LSS zugeordnet. Es gilt zwischen Zweck, Aktionen, Verhalten (tatsächliches und erwartetes) und Mittel zum Zweck zu unterscheiden, wobei Mittel zum Zweck nicht als Funktion aufgefasst werden sollte. Die Anwender fallen bestehenden Konventionen zur Darstellung und Formulierung von Funktion zum Opfer. Die Grundhypothesen sind also in Bezug auf Funktion zu beschränkt formuliert. Die bisher vorgeschlagene Definition von Funktion muss für andere Bedeutungen spezifiziert und erweitert werden.
- **HP4: Bei der Anwendung des C&C-Ansatz treten unspezifische Anwendungsbarrieren auf:** Die C&C-Ansatz unspezifischen Faktoren beziehen sich im Wesentlichen auf Grundlagen methodischen Vorgehens. Für jede Methode gilt es, ein gewisses Grundverständnis für deren Anwendung mitzubringen. An einigen Stellen kollidiert die Anwendung des C&C-Ansatz mit anderen Auffassungen methodischen Grundverständnisses. Beispiel hierfür ist die Ausrichtung der Vorgehensweise an der klassischen Konstruktionsmethodik. Dem Vorgehen wird kein Problemlösungsprozess zugrunde gelegt, sodass Funktionen nicht als eine Beschreibung des Verständnisses angesehen werden, sondern nur auf einer sehr abstrakten Ebene als Ausgangspunkt für die Lösungssuche dienen. Des Weiteren ist die grundsätzliche Motivation zur Methodenanwendung vor allem in Bezug auf die Nützlichkeit der Anwendung ein weiterer Faktor. Hierunter fallen Bausteine methodischen Vorgehens, wie beispielsweise ein strukturiertes

³⁶⁰ Die unterschiedlichen Ziele sind in Tabelle 15, S.181 beschrieben:

Auswählen und Bewerten. Für diese Faktoren werden bezogen auf die Anwendung des C&C-Ansatzes keine Anforderungen entwickelt, da diese als Grundvoraussetzung für die Anwendung vieler Methoden gelten und auch bereits formuliert sind.

7.1 Unterschiedliche Auffassungen, unterschiedliche Aktivitäten

Die in diesem Abschnitt gezogenen Schlussfolgerungen haben ihre Begründung maßgeblich in den Auswertungsabschnitten 5.2 und 6.2. Beim Lösen von Gestaltungsproblemen werden für unterschiedliche Aktivitäten unterschiedliche Auffassungen von Funktionen benötigt³⁶¹. VERMAAS³⁶² beschreibt bereits dieses Phänomen.

Die Auswertung der Projekte und des Experimentes zeigt, dass Anwender des C&C-Ansatzes zum großen Teil eine genaue Vorstellung von Funktion haben³⁶³, dass diese jedoch nicht für alle Aktivitäten geeignet sind³⁶⁴. Die eigene, erlernte Definition bezieht sich oft lediglich auf einen einzelnen Anwendungsbereich oder eine Konvention in der Darstellung oder Formulierung³⁶⁵. Erfahrene Projektbearbeiter und erfahrene Probanden des Experimentes haben, gelernt die Bedeutung von Funktion für unterschiedliche Aktivitäten anzupassen³⁶⁶. Hierbei sind sie sich jedoch nicht der unterschiedlichen Bedeutungen und Konventionen bewusst. Auf diese Weise kommen sie besser zurecht, wenn sie neuen Situationen begegnen.

Projekte und Experiment zeigen, dass sich die Auffassungen von Funktion entweder auf Bedeutung oder Konventionen zur Darstellung und Formulierung beziehen³⁶⁷. Dies führt dazu, dass die Anwendung von Funktion in der Praxis nicht optimal gelingt. Die Anwender halten sich in erster Linie an die Konventionen zur Darstellung und Formulierung ohne unterschiedliche Bedeutungen in Betracht zu ziehen und ohne diese hinsichtlich der Kompatibilität mit den Konventionen überprüfen. Es wird daher eine Trennung zwischen Bedeutung, Darstellung und Formulierung vorgeschlagen, die dann jeweils den Aktivitäten zugeordnet werden können.

³⁶¹ Bereits für die Analyse im Experiment werden unterschiedliche Bedeutungen, Darstellungen und Formulierungen benötigt, siehe Abschnitt 6.2.1 und 6.2.6

³⁶² Siehe Seite 29, Abschnitt 2.3.4

³⁶³ Siehe Abschnitt 5.2 und Abschnitt 6.2.1

³⁶⁴ In Projekten beispielsweise in Abschnitt -----5.2.1- und im Experiment Abschnitt 6.2.1 und 6.2.6

³⁶⁵ In Projekten beispielsweise in Abschnitt und im Experiment Abschnitt 6.2.1

³⁶⁶ Im Experiment Abschnitt 6.2.3 in Projekten verlief diese Problematik in den Schulungen weit weniger problematisch als in den Diplomarbeiten. In Schulungen berieten erfahrene Moderatoren

³⁶⁷ In Projekten beispielsweise in Abschnitt und im Experiment Abschnitt

Nachfolgend wird erklärt wie sich das Konzept von Funktion aus Bedeutung, Darstellung und Formulierung zusammensetzt, worauf die drei Bereiche Bedeutung, Darstellung und Formulierung im Speziellen betrachtet werden. Zum Abschluss des Abschnittes gibt eine Tabelle zusammenfassend Übersicht.

7.1.1 Konzept von Funktion

Die Problematik der Fixierung auf die Konventionen zur Darstellung und Formulierung führt dazu, dass die Anwender Anpassungen vornehmen müssen. Wenn ein Anwender beispielsweise den *Zweck des Systems* beschreiben möchte, dieser jedoch nicht als *Transformation von Flussgrößen* darstellbar ist, muss er eine neue Darstellung spontan selbst entwickeln.

Eine methodische Unterstützung für die Anwendung von Funktionen im C&C-Ansatz sollte also dahin gehen, dass der Anwender, je nach Aktivität auf ein Konzept von Funktionen zu greifen kann.

Ein Konzept von Funktion sollte deshalb aus folgenden Teilen bestehen:

- Bedeutung von Funktion: Das was man damit beschreiben möchte
- Darstellung von Funktion: Strukturierung und Visualisierung von Funktionen
- Formulierung von Funktionen: Gestaltbezogen-abstrakt, Sätze oder einzelne Worte

Diese Anforderung der **Ausgestaltung des Konzepts von Funktionen**³⁶⁸ für ein verbessertes Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz muss den flexiblen Vorgehensweisen beim Lösen von Gestaltungsproblemen (Abschnitt 2.2) Rechnung tragen. Es bildet die Grundlage für die formale Darstellung des C&C-Ansatzes (Abschnitt 7.2.6).

Nachfolgend werden die drei Bereiche eines Konzeptes von Funktion entwickelt. Hierbei wird die Vielzahl der aufgetretenen Bedeutungen, Darstellungen und Formulierungen durch weitere Erkenntnisse aus Projekten und Experiment spezifiziert.

7.1.2 Bedeutungen von Funktion

Die unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion werden benötigt und sollten nicht *umgangen* oder *verschleiert*³⁶⁹ werden. Eine Differenzierung und Hilfestellung zur Anwendung unterschiedlicher Bedeutungen ist notwendig, da die Sensibilisierung für

³⁶⁸ In dieser Arbeit wird die für die zu Grunde gelegten Arbeiten nachvollzogen, jedoch ist ein solches Konzept von Funktion sicherlich auch in anderen Bereichen sinnvoll, da dort die Problematik ähnlich sein dürfte

³⁶⁹ Siehe (Vermaas, 2010) in Abschnitt 2.3.

diese Unterschiede bisher nicht Teil der methodischen Unterstützung war und zu den aufgezeigten Problemen führt.

Für das Konzept von Funktionen werden alle von VERMAAS vorgeschlagenen Bedeutungen von Funktion und die Aktionen des Anwenders übernommen, da diese Bedeutungen für das Lösen von Gestaltungsproblemen wichtig sind:

- Funktion sollte immer etwas Aktives sein, etwas das *passiert*. Funktion sollte nicht als etwas Potenzielles beschrieben werden, da sonst eine Vermischung mit dem Zielbegriff entsteht. Der Zielbegriff beschreibt dieses Potenzial als einen gewünschten Zustand in der Zukunft, der mit einem Mittel erreicht werden soll. Dieses Mittel ist die Funktion, jedoch nicht das Ziel selbst.
- **Aktionen des Anwenders** mit dem zu entwickelnden Produkt werden als Funktion betrachtet. Dies sind Funktionen, die der Anwender erfüllt und damit auf das zu gestaltende System ausübt.
- Funktion im Sinne des **Zwecks**, im Sinne der auf die Umgebung auszuübenden Wirkung: Diese Bedeutung von Funktion kann die Rolle beschreiben, die ein System in seiner Umgebung spielt. Diese Beschreibung gibt der Erstellung von Produkten den Anstoß.
- Funktion im Sinne des **erwarteten Verhaltens**: Diese Bedeutung von Funktion gibt eine vorrangig innere Sicht auf das System wieder. Sie ist die innere Beschreibung dessen, was in der als Zweck formulierten Funktion beschrieben ist. Sie gibt wieder, wie die Wirkung auf die Umwelt erreicht werden kann. Sie gibt die Zusammenhänge im Inneren des Systems als idealisierte Beschreibung wieder.
- Funktion im Sinne des **tatsächlichen Verhaltens**: Diese Art der Funktionsbeschreibung gibt die inneren Zusammenhänge des Systems nicht im idealisierten, sondern im tatsächlich stattfindenden Zustand wieder. Diese Art der Funktion muss mithilfe einer bereits bestehenden Gestalt oder Gestaltbeschreibung herausgearbeitet werden. Der Abgleich der tatsächlichen mit der erwarteten Funktion ist die Motivation für alle Entwicklungstätigkeiten³⁷⁰.
- Physikalisch/chemische Effekte: Es ist notwendig eine Beschreibung für lokale Vorgänge bereitzustellen, da sich Analyse und Synthese auch immer auf einzelne Elemente im System beziehen. Die vertiefte Kenntnis über die Vorgänge und die detaillierte Ausgestaltung von Einzelelementen ist ein weiterer Kernbestandteil des

³⁷⁰ Mit Entwicklung wird hier ganz maßgeblich die Validierung von technischen Systemen im Sinne von ALBERS verstanden. Sie ist wohl der Kosten- und Zeitintensivste Teil der Produktentwicklung. Das tatsächliche Verhalten eines komplexen Systems ist niemals vollständig bekannt und weicht somit immer vom erwarteten ab (Albers, et al., 2010b).

Lösens von Gestaltungsproblemen. Die Einzelemente werden durch die Beschreibung als Funktion im Sinne des idealisierten oder tatsächlichen Verhaltens in Bezug zueinander gesetzt. Die Wirkung ist die Nutzung eines physikalischen Effektes in einem technischen System. Die Wirkung beschreibt das Resultat eines Effektes.

7.1.3 Darstellung der Funktionen

Die Darstellung von Funktionen gibt an, wie Funktionen strukturiert werden und wie der Bezug zur Gestalt dargestellt wird.

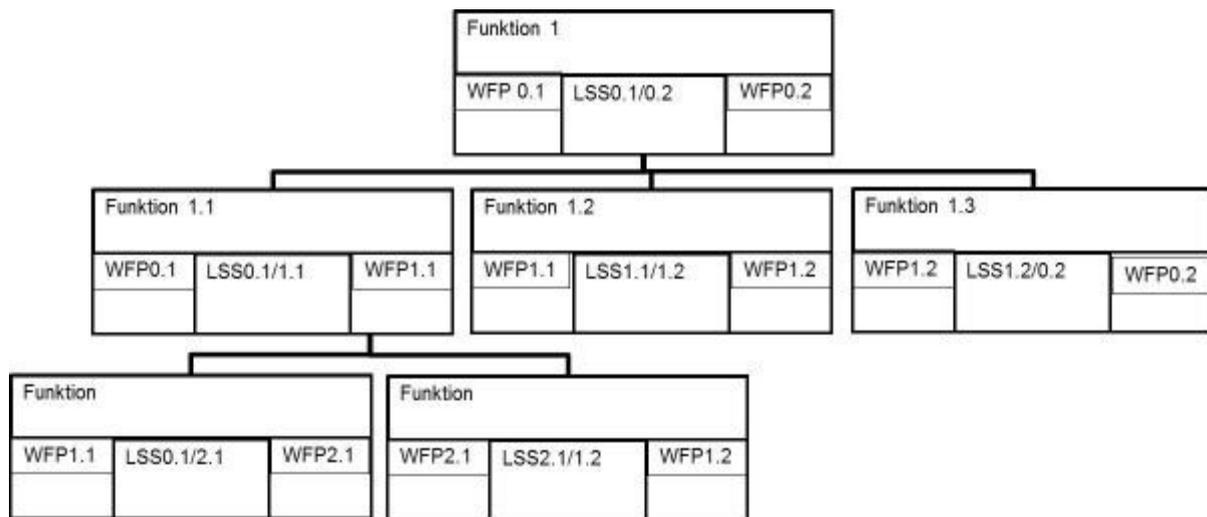


Abbildung 71: Hierarchischer Baum mit WFP

Die nachfolgenden Anforderungen sind auch hier aus der Auswertung der Projekte und des Experimentes abgeleitet:

- Der Funktionenbaum strukturiert die Funktionen hierarchisch und hält damit nur die hierarchischen Beziehungen fest³⁷¹. Wurden in diese Bäume die WFP und LSS eingetragen, die für die jeweilige Funktion verantwortlich sind (Abbildung 71), konnte zudem die Beziehung zur Gestalt hergestellt werden, indem die WFP und LSS auch auf der Gestalt lokalisiert werden. Indirekt wird dann auch die Beziehung der einzelnen Teilfunktionen zueinander sichtbar, da WFP benachbarte Funktionen verbinden. Beispielsweise WFP1.1 und WFP1.2, die in den Funktionen 1.1 und 1.2 bzw. 1.2 und 1.3 zu finden sind.

Prozedural: Die prozedurale Darstellung von Funktionen entstammt der Konvention Funktion als Transformation von Flussgrößen aufzufassen und wurde für den C&C-Ansatz als Grundlage der Formulierung von Funktion eingesetzt³⁷². Dies spiegelt sich

³⁷¹ Beispiel hierfür siehe Abschnitt 5.3.2, S.101f

³⁷² (Matthiesen, 2002)

bereit im Namen *Contact and Channel* wider. Anwender müssen hierbei zwischen der Auffassung als Flussgrößen und der Darstellung als Blackbox mit Pfeilen unterscheiden. Die Flussgrößen werden mit Hilfe von WFP und LSS geleitet werden. Jedoch verleitet die Blackbox Darstellung dazu, Flüsse in jedem Falle³⁷³ als *durch* WFP und LSS hindurch geleitet anzusehen. Die Betrachtung über Flussgrößen von Energie Material und Information ist jedoch bei vielen Aktivitäten nützliches Hilfsmittel um das Verhalten des Systems darzustellen. Wird ein prozedurales Modell von Funktion mit der Transformation von Flussgrößen benötigt, kann die hierarchische Darstellung mit WFP und LSS (Abbildung 71) in eine prozedurale Strukturierung überführt werden.

- In vielen Fällen der Beschreibung mechanischer Systeme war die Darstellung von Funktion als Transformation von Flussgrößen hilfreich, jedoch verursachte die Darstellung von Materialflüssen die oben beschriebenen Missverständnisse. Flüsse von Material sollten in den meisten Fällen ausgegliedert werden, da diese als einzige der drei Größen physisch, gegenständlich sind (siehe Abschnitt 5.2.1). Die abzubildende Größe sollte als separates Teilsystem mit einer eigenen Funktion betrachtet werden. Die Zuordnung von Flussgrößen kann jedoch auch in die hierarchische Darstellung aus Abbildung 71 integriert werden. Die Flussgrößen werden in die beigefügten Kästen eingetragen.
- Textuell: Die Beschreibung von Funktion in Texten wird sehr viel aufschlussreicher, wenn die als Fließtext oder in Sätzen³⁷⁴ beschriebenen Funktionen durch Verweise mittels WFP und LSS einer Gestaltdarstellung zugeordnet werden³⁷⁵. Es entsteht eine Sprache, die viele unterschiedliche Darstellungen vereinheitlicht. Dieser Sachverhalt gilt ebenfalls für die verbale Beschreibung von Funktion. Wenn verbal beschrieben wird, gibt es immer mindestens einen Zuhörer, der versucht die Beschreibung der Funktion nachzuvollziehen. Hier ist es sinnvoll ebenfalls mit Zeichnung, Skizze o. ä. zu arbeiten, die eine Markierung der diskutierten Funktionen mit Hilfe von WFP und LSS beinhaltet. Dies hängt eng zusammen mit der Art und Weise Funktionen zu formulieren.

7.1.4 Formulierung von Funktionen

In der Einleitung dieses Kapitels wurde beschrieben, dass sich Projektbearbeiter und Probanden des Experiments oftmals an Konventionen zur Darstellung oder

³⁷³ Siehe Abschnitt 5.2.1 in Projekten und Abschnitt 6.2.2 im Experiment

³⁷⁴ Dies sind beispielsweise die Einleitungskapitel in allen Diplomarbeiten im Experiment 2.2.

³⁷⁵ Siehe beispielsweise die Beschreibung der Funktionsweise der Axialkolbenpumpe in Abschnitt 6.1.1, S.117

Formulierung von Funktion gehalten haben. Dadurch konnte der gerade bearbeitete Sachverhalt nicht so beschrieben werden, wie gewünscht. Die Funktion sollte demnach in erster Linie so formuliert werden, dass sie wiedergibt, was der Anwender ausdrücken möchte, d. h., die Formulierung sollte sich nach der Bedeutung richten³⁷⁶, wie in beschrieben. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine explizite Funktionsbeschreibung zu weniger Missverständnissen führt³⁷⁷.

Die Analyse der Projekte und des Experimentes zeigt, welche Formulierungen sinnvoll sind und welche nicht: Die Konvention der Verb-Nomen-Paarung³⁷⁸, Substantiviert als ein Wort³⁷⁹, Gestalt-Lösungsneutral³⁸⁰, Wirkprinzip beschreibend³⁸¹, Formulierung in Sätzen³⁸². Als Konsequenz hieraus und unter Einbeziehung der vorhergehenden Abschnitte zu Bedeutung und Darstellung von Funktion ergibt sich der Vorschlag, Funktionen als Interaktion mit Nachbarsystemen aufzufassen. Dieser Vorschlag wird als Zusammenfassung dieses Abschnittes in Abschnitt 7.1.5 beschrieben. In diesem Vorschlag wird dann aufgezeigt, welche Formulierung für welche der in Abschnitt 7.1.2 beschriebenen Bedeutungen von Funktion sinnvoll ist.

Da in diesem Kapitel ein Konzept von Funktion entwickelt wird, sind die beobachteten Sachverhalte den in Abschnitt 7.1.2 beschriebenen Bedeutungen zugewiesen:

- Funktion im Sinne von Zweck: Sollten mit Bezug zur Gestalt, und damit konkret formuliert werden, da diese Bedeutung in den meisten Fällen dazu dient, das Umfeld des Systems zu verstehen. Es ist sinnvoll Nachbarsystem bezogen zu formulieren³⁸³. *Um-zu*³⁸⁴ Formulierungen verdeutlichen den Zweck, der verfolgt wird. Abstrakte Formulierungen sind für die Suche nach neuen Einsatzzwecken sinnvoll.
- Funktion im Sinne des erwarteten Verhaltens: Sollten in erster Linie mit Bezug zur Gestalt, und damit konkret formuliert werden, da diese Bedeutung dazu dient, die Vorgänge im System zu verstehen. Konkret werden diese Beschreibungen, wenn

³⁷⁶ Und nicht nach einer bestimmten Syntax, die gewählt wird um Funktionen im Rechner ab zu bilden oder die Wahlmöglichkeiten einzuschränken und Abschnitt 7.1.2

³⁷⁷ Siehe Erkenntnisse zur Tiefe des Systemverständnisses, Abschnitt 5.3.3 und Abschnitt 6.3.4

³⁷⁸ Abschnitt 5.2.1, Abschnitt 6.3.3

³⁷⁹ Abschnitt 5.2.4 Abschnitt 0

³⁸⁰ Abschnitt 5.2.1, Abschnitt 0

³⁸¹ Abschnitt 5.2.7

³⁸² Abschnitt 5.2.8

³⁸³ Siehe Abbildung 45, S.118

³⁸⁴ Siehe Abschnitt 6.2.2

durch *mittels*³⁸⁵-Formulierungen verwendet werden. Es ist sinnvoll Nachbarsystem bezogen zu formulieren. Abstrakte Formulierungen dienen dazu, einen Ausgangspunkt für die Suche nach Lösungen zu schaffen³⁸⁶.

- Funktion im Sinne des tatsächlichen Verhaltens: Es gilt derselbe Vorschlag, wie für das tatsächliche Verhalten, jedoch sollten Beschreibungen des tatsächlichen Verhaltens immer konkret sein.
- Aktionen mit dem betrachteten System: Es gilt derselbe Vorschlag, wie für das tatsächliche Verhalten, jedoch sollten Beschreibungen von Aktionen der Nachbarsysteme immer konkret sein.
- Wirkung und Effekt: Für Effekte eignen sich die substantivierten Verben, die eben den Effekt benennen³⁸⁷. Die Wirkung ist das Resultat eines Effektes bezogen auf das zu gestaltende System. Auch hier kann mit substantivierten Einzelworten formuliert werden³⁸⁸. Diese Hinweise sind jedoch nicht zwingend. Effekte können auch in Sätzen beschrieben werden.
- Analyse und Synthese: Bei der Analyse sollte so konkret wie möglich, also Gestaltbezogen Funktionen formuliert werden. Dies erfordert eine Formulierung in Sätzen, die keiner Bedeutung verkürzenden Konvention unterliegt. Ist das Problem ausreichend verstanden und kommuniziert, können die konkret formulierten Funktionen abstrahiert werden und Ausgangslage für die Synthese³⁸⁹ sein. Wird direkt abstrakt formuliert, werden die Analyse und das Verständnis für die Funktion vernachlässigt, sodass der Lösungsraum unbegründet eingeschränkt wird.

Die wesentliche Anforderung an das Formulieren der Funktion ist, dass es eine Möglichkeit gibt, die Funktion so zu formulieren, dass diese für die unterschiedlichen Bedeutungen und die unterschiedlichen Aktivitäten nutzbar ist. D. h., es sollte eine Art und Weise der Formulierung von Funktion geben, die allen Bedeutungen und gerecht wird. Ein Vorschlag zur Formulierung der Funktion muss die Vorgänge im System, dessen Wirkung auf die Umgebung, aber auch das tatsächliche und erwartete Verhalten wiedergeben können. Deshalb wird vorgeschlagen, Funktion als *Interaktion mit Nachbarsystemen* zu formulieren.

³⁸⁵ Beispielsweise „Antriebskraft mittels Hebelwirkung vergrößern“ oder Abbildung 45, S.118

³⁸⁶ Siehe Abschnitte 5.3.3, 5.3.4, 5.2.7

³⁸⁷ Beispielsweise „Reibung“ oder „Klemmen“ oder „Körnen“

³⁸⁸ Die Wirkung des „Effekt Reibung“ ist eine „Kraftübertragung“

³⁸⁹ Dies kann beispielsweise mit der durch die VDI Richtlinie 2223 vorgeschlagenen Verb-Nomen Konvention durchgeführt werden.

7.1.5 Zusammenfassung - Funktion als Interaktion mit Nachbarsystemen

Die Auffassung von Funktion als Interaktion mit Nachbarsystemen³⁹⁰ sollte für jede Bedeutung die Nennung der Nachbarsysteme beinhalten. Funktionen sollten beschreiben, wie das betrachtete System auf das benachbarte System wirkt. Beispielsweise: „*Die Vorwärtsbewegung des Kolbens zum Abtrieb leiten* als Funktion des Hydrauliköls in der Axialkolbenpumpe. Diese Formulierung ist bereits konkret, denn sie gibt Hinweise über die Abläufe im System. Noch konkreter wird die Funktionsbeschreibung, wenn zusätzlich die Interaktion mit dem Druckschlauch und der Pumpeninenseite beschrieben wird. *Die Vorwärtsbewegung des Kolbens in Pumpe und Schlauch zum Abtrieb leiten*. Das Öl interagiert mit dem Kolben (WFP1.4 im Vergleichsmodell, Abschnitt 6 und im Anhang der Arbeit), mit der Pumpeninwand (WFP1.5 im Vergleichsmodell) und der Innenseite des Druckschlauchs (WFP1.5 im Vergleichsmodell).

Der Name des betrachteten Systems darf hierbei nicht als Operand³⁹¹ in der Formulierung der Funktion erscheinen, da dadurch die Funktion eines benachbarten Systems beschrieben wird. Im angesprochenen Beispiel des Hydrauliköls lautet diese ungeeignete Formulierung: *Das Öl so in Schlauch und Pumpe einsperren, dass die Vorwärtsbewegung der Kolben zum Abtrieb geleitet wird*. Diese Formulierung beschreibt zwei Funktionen von zwei Teilsystemen. Zum einen die gewollte: *Die Vorwärtsbewegung des Kolben zum Abtrieb leiten*. Zum anderen wird hiermit beschrieben, wie sich Innenwand und Schlauch in Bezug auf das Öl verhalten. Innenwand und Schlauch haben die Funktion: *Öl einsperren*. Das Öl kann jedoch keine Funktion mit sich selbst ausführen³⁹².

Noch konkreter wird die Beschreibung von Funktion, wenn das Wirkprinzip oder eine Gestaltbeschreibung mit in die Formulierung der Funktion einfließt. Beispielsweise: *Die Vorwärtsbewegung des Kolbens durch Hydrauliköl³⁹³ zum Abtrieb leiten*.

³⁹⁰ Bei der Beschreibung von Materialflüssen ist im Besonderen darauf zu achten, dass richtig bewertet wird, ob der Materialfluss durch WFP und LSS hindurch stattfindet. Materialfluss findet als Interaktion nicht statt. Es hat sich als sinnvoll herausgestellt Materialflüsse als separate Systeme zu betrachten. Beispielsweise geht das Öl der Hydraulikpumpe nicht als Materialfluss in das System hinein und wieder hinaus, sondern wird als Teilsystem der Pumpe betrachtet. Das Öl selbst erfüllt eine zentrale Funktion in der Pumpe. Unter den Flüssen Material, Energie und Information ist das Material die einzige Größe, die immer eine physische Gestalt besitzt. Es fällt den Anwendern in vielen Fällen schwer, ein Flussmodell mit Material aufzubauen, wenn ein ganz konkretes, existierendes System vorliegt (siehe Kapitel 6 und Abschnitt 5.2.1).

³⁹¹ Der Operand in der angeführten Funktion des Hydrauliköls darf nicht das Hydrauliköl sein, da der Operand das System beschreibt, auf das das betrachtete System wirkt.

³⁹² Siehe Abschnitt 5.4.4, S.110

³⁹³ Eine weitere Variante hiervon ist: *Die Vorwärtsbewegung des Kolbens mit Hydraulikdruck zum Abtrieb leiten*. Die Wahl des Wortes Hydraulikdruck entspricht eher dem Wirkprinzip als der Beschreibung der Gestalt.

7.2 Verlauf der Problemlösung und Funktionen

Der Verlauf der Problemlösung bestimmt das benötigte Konzept von Funktion. Je nach Ziel des Problemlösens werden unterschiedliche Konzepte von Funktionen benötigt, die aufeinander aufbauen und jeweils unterschiedliche Sichten auf das Problem geben.

In diesem Abschnitt werden diese unterschiedlichen Aktivitäten aus der Analyse von Projekten und Experiment herausgearbeitet. Diesen Aktivitäten, die im Verlauf der Problemlösung auftreten, werden im Abschnitt 7.2.6 als Zusammenfassung Bedeutung, Darstellung und Formulierung zugeordnet.

Die Auswertung der Projekte und des Experimentes zeigt, dass die Wahl einer einzelnen Bedeutungen oder Darstellung von Funktion nicht für das gesamte weitere Vorgehen nützlich ist. Es werden unterschiedliche Konzepte von Funktion benötigt³⁹⁴. Bei der Auswertungen wurden Aktivitäten beobachtet, die Einfluss auf die Verwendung von Funktion haben: Übersicht behalten, Tiefe des Systemverständnisses, Aufbau und Struktur des Systemverständnisses, Aufgeben der Systematik, Durchgängige in Analyse und Synthese:

7.2.1 Übersicht behalten und gezielt vertiefen (Systemtechnik)

Das Verständnis für die Funktionen eines technischen Systems setzt sich zusammen aus übergeordneten, Zweck repräsentierenden Beschreibungen (wofür das Ganze) und aus an den richtigen Stellen vertieftes Verständnis für die Vorgänge zusammen.

Für ein Vorgehen in Sinne der Systemtechnik sind unterschiedliche Bedeutungen von Funktion unerlässlich³⁹⁵.

Im Experiment³⁹⁶ und in den Projekten spiegelt sich dieser Sachverhalt in einer Vielzahl von Studien wieder. Beispielsweise war es während der Schulungen³⁹⁷

³⁹⁴ Siehe beispielsweise Abschnitt 5.2 und Abschnitt 6.3.3

³⁹⁵ Diese unterschiedlichen Sichten der Systembeschreibung spiegeln sich in den von VERMAAS aufgestellten Bedeutungen von Funktion wieder. Wenn diese unterschiedlichen Sichtweisen in der Systemtechnik als notwendig bezeichnet werden, so liefert VERMAAS mit der Beschreibung des Spektrums zwischen Zielen und Struktur Beschreibungsformen für die jeweilige Aktivität: Der allgemeine Kontext kann als das Ziel des Handelns verstanden werden und wird, herunter gebrochen auf das System, mit einer Zweck beschreibenden Funktion ausgedrückt. Der Zweck des Wirkens eines Entwicklungsingenieurs kann als das Erkennen des tatsächlichen Verhaltens des Systems (die Problemeingrenzung) und der Vergleich mit dem erwarteten Verhalten des Systems bezeichnet werden. Aus dieser Diskrepanz lässt sich eine Produktentwicklungsaufgabe ableiten. Die Handlungen des Entwicklungsingenieurs sind das Gestalten des Systems, das sich in der Gestaltung des Systems und damit in der Veränderung des tatsächlichen Verhaltens des Systems zeigt.

³⁹⁶ Abschnitt 6.2.4, S. 143 und in Projekten Abschnitt 5.3.5, S. 104

³⁹⁷ Abschnitt 5.1.3, S. 81,

enorm hilfreich auf einer übergeordneten Ebene den Zweck der Modellbildung und die Zweck beschreibende Hauptfunktion zu bestimmen, bevor vertieft das tatsächliche Verhalten des Systems in Bezug auf das erwartete Verhalten untersucht wurde³⁹⁸. Die Funktionsbeschreibung im Sinne des Zwecks dient dann der Erzeugung von Verständnis für die übergeordneten Ziele und für die Technik auf übergeordneter Ebene. Der Entwickler arbeitet das Verhalten (erwartet und tatsächlich) des Systems heraus und ändert das tatsächliche Verhalten des Systems, indem er die Gestalt ändert. Diese Lösungen können in die erarbeitete Struktur eingeordnet und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem abgeschätzt werden³⁹⁹. Im Experiment zeigt sich dieser Sachverhalt in der Übersichtlichkeit der Funktionsstrukturen einzelner Probanden⁴⁰⁰. Hierbei waren diejenigen Probanden erfolgreicher, die nach einer Top-down Vorgehensweise vorgegangen sind und die Analyse bewusst an einigen Stellen vertieft haben.

7.2.2 Bedeutung und Ausmaß des Systemverständnisses

Die Literatur zur Erforschung erfolgreicher Abläufe beim Lösen von Gestaltungsproblemen gibt wieder, dass eine ausführliche Analyse des Problems Grundlage für erfolgreiches Vorgehen ist. Wann ist jedoch ein Problem ausführlich analysiert und wann kann das System als verstanden gelten?

Das System ist verstanden, wenn die Funktionen, die durch das Zusammenwirken bestimmter Baugruppen (erwartetes und tatsächliches Verhalten) erfüllt werden, bekannt sind. Zusätzlich erfordert Systemverständnis die Kenntnis der Bedingungen, Zwecke und Aktionen, die in Bezug zur Umwelt des Systems stehen. Systemverständnis beinhaltet also eine Zweck-orientierte und eine Verhaltens-orientierte Perspektive.

Die Auswertung von Projekten und Experiment zeigt, dass Systemverständnis subjektiv ist. Vergleicht man die Probanden des Experimentes, ist zu erkennen, dass sich die Zuordnung von Funktion und Gestalt, in der sich das Verständnis eines Entwicklers für das System manifestiert, auf unterschiedliche Hierarchie- und Abstraktionsebenen bezieht. Im Stand der Forschung⁴⁰¹ wird dies in der Arbeit von VISSER aufgezeigt. VISSER hat beobachtet, dass Erfahrene und Neulinge unterschiedliche Abstraktionsebenen bevorzugen, je nachdem, ob sie eher verstehen müssen, wie das System auf die Umgebung wirkt oder wie das System diese

³⁹⁸ Siehe Abschnitt 5.5.3 und 5.3.5

³⁹⁹ Abschnitt 5.3.2, Seite 101

⁴⁰⁰ Abschnitt 6.3.2, Seite 150

⁴⁰¹ Abschnitt 2.2.5, Seite 20

Wirkung⁴⁰² erzielt (Verhalten). Das unterschiedliche Systemverständnis hängt also ab von der *empfundenen* Hierarchiestufe, auf der Funktion und Gestalt zugeordnet werden können. Der Begriff *vertieftes Systemverständnis* spiegelt diesen Sachverhalt genau wieder. Die Tiefe bezieht sich auf die Hierarchiestufe der Funktionenstruktur (Abbildung 72).

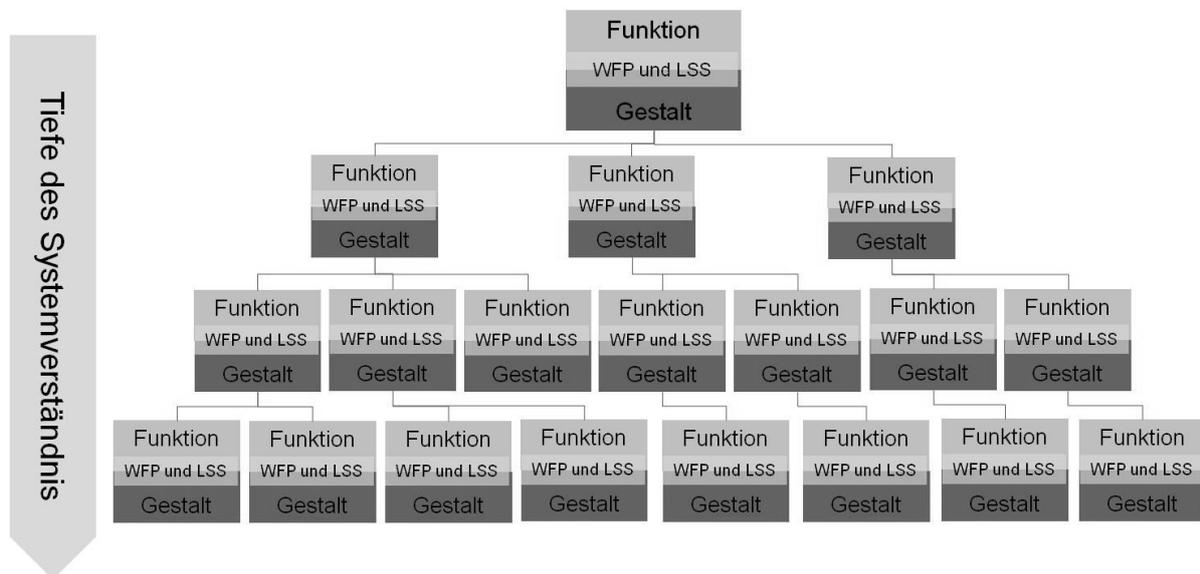


Abbildung 72: Tiefe des Systemverständnisses bezogen auf die Hierarchie von Funktion

Wenn beispielsweise Ingenieur 1 sagt, „ich habe verstanden, wie das System funktioniert“ und sich hiermit auf der zweiten Ebene bewegt und Ingenieur 2 sagt, „ich habe das System noch nicht verstanden“, weil er davon ausgeht, dass er bis zur vierten Ebene vordringen muss⁴⁰³, ist ein Missverständnis vorprogrammiert. Die unterschiedlichen Auffassungen beziehen sich auch auf unterschiedliche Sichtweisen auf das System. Diese unterschiedlichen Sichtweisen sind wiederum mit den unterschiedlichen Bedeutungen von Funktionen verbunden. So kann das System als verstanden gelten, wenn ein Entwickler das *Funktionsprinzip* verstanden hat oder aber auch erst zu dem Zeitpunkt, wenn er das vollständige Verhalten des Systems kennen würde.

Um in dieser Situation methodische Unterstützung bereit zu stellen kann nicht pauschal ein Ratschlag gegeben werden bis zu welcher Ebene man vordringen muss, um effizient Lösungen zu suchen und um mit einer gewissen Sicherheit eine *funktionierende* Lösung zu finden. Vor allem das Experiment, aber auch die Projekte spiegeln diesen Sachverhalt wider⁴⁰⁴. Geht man davon aus, dass sich ein Großteil

⁴⁰² Wirkung im Sinne der Manipulation der Umwelt

⁴⁰³ Abschnitt 6.3.4, S. 153

⁴⁰⁴ Abschnitt 6.3.4, S. 153

von potenziellen späteren C&C-Ansatz Anwendern im Klaren darüber ist, dass für eine erfolgreiche Vorgehensweise eine ausführliche Analyse des Problems notwendig ist. Spiegelt man diesen Sachverhalt zusätzlich an der Unterschiedlichkeit in der Auffassung für *Systemverständnis*, wird klar, dass eine methodische Unterstützung schwer bereitzustellen ist. Abbildung 73 zeigt schematisch das Ergebnis der Auswertung der Projekte: Wenn beispielsweise eine Gruppe von Probanden davon ausgeht, dass das Problem verstanden ist, wenn das Funktionsprinzip erfasst ist⁴⁰⁵, resultiert hieraus ein Vorgehen, das einer reinen Lösungssuche gleicht. Die Sicherheit, eine funktionierende Lösung zu finden ist dann relativ gering, der Aufwand ebenfalls. Viele Versuche erhöhen jedoch den Aufwand ohne die Sicherheit der Lösungsfindung zu erhöhen.

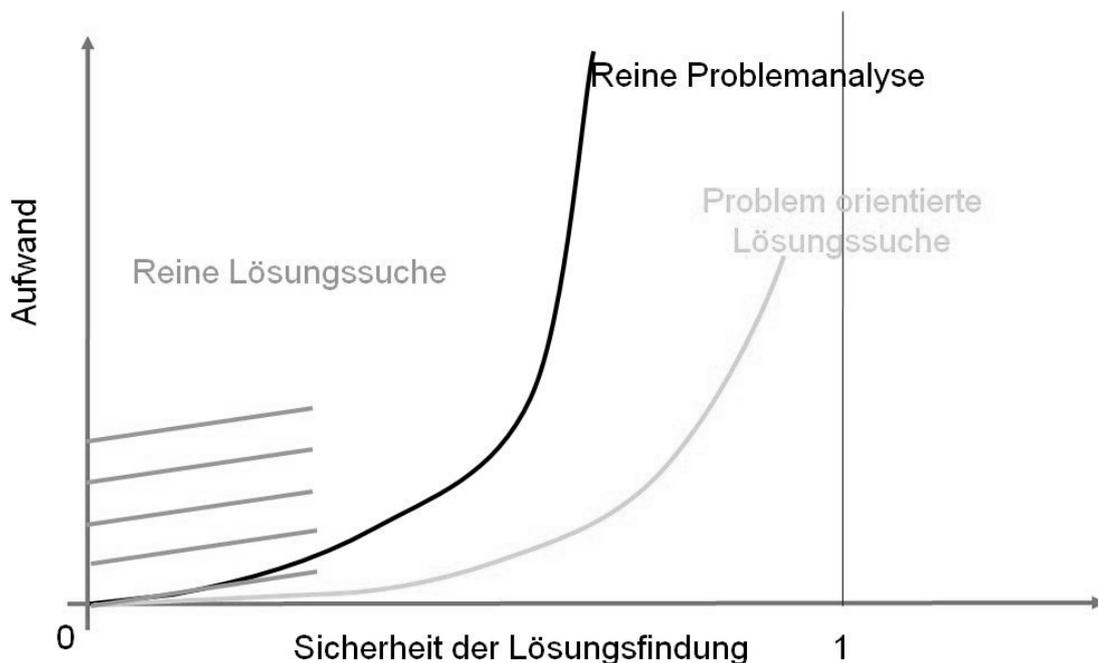


Abbildung 73: Zusammenhang von Aufwand und Sicherheit der Lösungsfindung

Auf der anderen Seite steht die reine Problemanalyse. Die Entwickler versuchen ausführlich, bis ins letzte Detail das Problem zu bestimmen und treiben hierfür einen großen Aufwand⁴⁰⁶. Die Sicherheit eine funktionierende Lösung zu finden wird dieses Vorgehen jedoch auch nicht bringen, da sich das Problem mit dem Umsetzen einer Lösung teilweise wieder verändert. Die neue Lösung bedeutet, dass neu

⁴⁰⁵ Bspw. das Prinzip Axialkolbenpumpe in Abbildung 45: Durch eine Schrägachse wird aus der Rotation des Antriebes eine Translationsbewegung der Kolben erreicht. Proband Nr. 13 im Experiment repräsentiert diese Position.

⁴⁰⁶ Bspw. gilt die Axialkolbenpumpe erst als verstanden, wenn sich der Entwickler erklären kann, wie sich der Schmierfilm zwischen Steuerscheibe und Zylinder aufbaut Abbildung 45. Proband Nr. 5 im Experiment repräsentiert diese Position.

eingebraachte Elemente Auswirkungen auf die bestehenden Teile des Systems haben und weitere Probleme hervorbringen. Der Aufwand wächst stark, ohne entscheidend die Sicherheit eine Lösung zu finden zu erhöhen.

Am sinnvollsten scheint deshalb, eine problemorientierte Lösungssuche zu verfolgen. Hierbei wird akzeptiert, dass das Problem niemals vollständig bestimmt werden kann und dass die Veränderung des Problems mit der Lösungssuche einhergeht. Man wird praktisch erst wissen, was das Problem ist, wenn man eine funktionierende Lösung gefunden hat.

Zeitpunkt zu dem begonnen wird Lösungen zu suchen

Die Lösungssuche sollte beginnen, wenn gut begründete Hypothesen für das Problem vorliegen und eine weitere Be- oder Wiederlegung der Hypothesen nicht mehr mit angemessenem Aufwand⁴⁰⁷ zu rechtfertigen ist.

Der angemessene Aufwand richtet sich nach dem Aufwand, der für die Implementierung der Lösung notwendig ist. Die Implementierung der Lösung ist nach diesem Zeitpunkt weniger aufwendig als die Verifizierung der Hypothese durch ein anderes Mittel und führt zum selben Ergebnis⁴⁰⁸.

7.2.3 Gemeinsames Verständnis für das Problem

Für eine effektive Zusammenarbeit beim Lösen von Gestaltungsproblemen ist das gemeinsame Verständnis vom Problem und von den Funktionen ein entscheidender Faktor, wenn mehrere Entwickler an einer Aufgabe arbeiten. Im Stand der Forschung wird von HACKER⁴⁰⁹ auf Basis von empirischen Studien dargelegt, dass eine sorgfältige Problemanalyse einen erfolgreichen Prozess charakterisiert und dass ein gemeinsames Verständnis für das Problem notwendig ist, damit der Prozess im Team erfolgreich ablaufen kann. HINDS und WEISBAND⁴¹⁰ beschreiben die Wichtigkeit des gemeinsamen Verständnisses ebenfalls. Problematisch wird dies, wenn Probanden mit unterschiedlichem Hintergrund und unterschiedlichen Interessen kommunizieren müssen. Die unterschiedlichen Auffassungen und Interpretationen

⁴⁰⁷ Dies wird in ähnlicher Weise bereits von ALBERS im Zusammenhang mit der SPALTEN Methoden beschrieben, (Albers, et al., 2005)

⁴⁰⁸ Beispiel: Aufgabe ist die Schmierung der Axialkolbenpumpe zwischen Zylinder und Steuerscheibe aus Abbildung 45 zu verbessern. Um die Vorgänge im Schmierpalt zu genau erklären ist eine aufwendige Versuchsreihe notwendig. Auf Basis der bisherigen Untersuchungen gibt es bereits eine neu gestaltete Steuerscheibe, deren Herstellung und Test weniger aufwendig sind als die Versuchsreihen mit der bisherigen Steuerscheibe.

⁴⁰⁹ (Hacker, 1997) und Abschnitt 2.2.4, Seite 19

⁴¹⁰ (Hinds, et al., 2003),

der Probanden resultieren aus unterschiedlichen Ausbildungen und unterschiedlichen Erfahrungen in verschiedenen Feldern⁴¹¹.

In Schulungen und Entwicklungsprojekten⁴¹² konnte beobachtet werden, dass Probleme auftreten, wenn gemeinsam ein Verständnis aufgebaut werden soll. Die Probanden fassen Funktionen sehr unterschiedlich auf. Einerseits bezieht sich diese Auffassung auf Unterschiede in der Bedeutung und Darstellung von Funktion⁴¹³, andererseits bezieht sich die unterschiedliche Auffassung auf eine unterschiedliche Wahrnehmung des Betrachtungsraumes⁴¹⁴. Für das gemeinsame Bearbeiten von Gestaltungsproblemen sind insbesondere folgende Faktoren von Bedeutung:

- Gemeinsame Zielklärung. Auch wenn diese zu Beginn eines Projektes trivial erscheint, sollte das Ziel, weshalb die Teilnehmer zusammenkommen, gemeinsam explizit formuliert und transparent dargestellt werden.
- Der Betrachtungsraum sollte mithilfe der Hauptfunktion und der dazugehörigen WFP und LSS gemeinsam zu Beginn der Arbeit explizit festgelegt und begründet werden.
- Im weiteren Verlauf sollte die Fokussierung des Betrachtungsraumes auf die gleiche Art und Weise wie die Hauptfunktion heruntergebrochen werden.
- Hypothesen und Begründungen für Abweichungen des tatsächlichen Verhaltens vom erwarteten Verhalten sollten ebenfalls explizit und transparent dargestellt werden und mit Hilfe von WFP und LSS der Gestalt zugeordnet werden.

Insbesondere sind bei einer gemeinsamen Bearbeitung Vorgehensweise und Begründung für die einzelnen Schritte transparent darzustellen. Sobald einem Teammitglied die Systematik nicht transparent erscheint, kann dieser nicht ohne Weiteres effektiv an der Lösung des Problems teilnehmen.

Das Aufgeben der Systematik gilt es in jedem Fall zu vermeiden. Im nächsten Abschnitt ist dies vertieft beschrieben.

7.2.4 Aufgaben der Systematik

In Projekten und Experiment trat das von VISSER⁴¹⁵ bereits beschriebene Phänomen in zweierlei Varianten auf.

⁴¹¹ (Bucciarelli, 1996)

⁴¹² Siehe Abschnitte 5.1.3 und 5.1.4

⁴¹³ Siehe Abschnitt 5.1 und 0

⁴¹⁴ Abschnitt 5.4.5, Seite 113

⁴¹⁵ (Visser, 1996)

Zum einen ist die vorschnelle Fokussierung auf einen Problembereich zu beobachten. Dies geht einher mit einem Aufgeben der zu Beginn festgelegten Vorgehensweise⁴¹⁶. Zum zweiten werden die Ergebnisse einer guten Problemanalyse aufgegeben⁴¹⁷, wenn es an die Suche von Lösungen geht. Beide Phänomene hängen direkt mit der Vorgehensweise und der damit verbundenen Strukturierung der Funktionen zusammen. Beide Auffälligkeiten gilt es beim Lösen von Gestaltungsproblemen mit Hilfe eines systematischen Aufbaus der Struktur der Funktionen zu vermeiden.

7.2.4.1 Funktionen herausarbeiten – bei der Analyse Übersicht behalten

Das Experiment zeigt, dass ein kontinuierliches Aufschreiben der Funktionen mit direktem Bezug zur Gestalt mithilfe des C&C-Ansatzes zu mehr auf Papier gut strukturierten Funktionen führt⁴¹⁸. Die Struktur sollte auch in Problemsituationen beibehalten werden. Dies gilt vor allem auch dann, wenn Funktionen herausgearbeitet werden muss, weil die Probanden sie nicht erklären können.

Funktionen und ihre Ordnung strukturieren die Lösungssuche und helfen den Lösungsraum systematisch einzugrenzen, beziehungsweise zu öffnen. Eine unsystematische Analyse, bei der Funktion und Gestalt nicht gleichzeitig aufeinander abgestimmt werden, führt in vielen Fällen zu einem weniger vollständigen und weniger übersichtlichen Analyseergebnis⁴¹⁹. Der Raum, in dem Lösungen gesucht werden, ist dann durch die unvollständige und unübersichtliche Analyse eingeschränkt oder zu groß. Eine systematische Vorgehensweise vor allem in unbekanntem Situationen ist unerlässlich.

7.2.4.2 Trennung von Analyse und Synthese

Einige Projektbearbeiter suchten Lösungen ohne das zuvor erstellte Analyseergebnis⁴²⁰ zu verwenden. Das Analyseergebnis grenzt mit gut begründeten Hypothesen den Problembereich ein und liefert somit die Ansatzpunkte für die Suche von Lösungen. Dies führte dazu, dass die gefundenen neuen und scheinbar *innovativen*⁴²¹ Ideen nicht in die Randbedingungen der bestehenden Teile des Systems zu integrieren waren oder dass diese Integration unzulässige Änderungen der benachbarten Systeme erfordert hätte. Wird hingegen ausgehend von einer

⁴¹⁶ Abschnitt 6.3.1, Seite 147

⁴¹⁷ Abschnitt 5.3.2, Seite 101

⁴¹⁸ Abschnitt 6.3.2, Seite 150

⁴¹⁹ Abschnitt 6.3.2, Seite 150

⁴²⁰ Abschnitt 5.3.2, Abbildung 34

⁴²¹ Innovativ im Sinne von Neu und anders. Bei diesem landläufigen Innovationsbegriff wird die Umsetzungsmöglichkeit vernachlässigt, was jedoch im Sinne von ALBERS und SCHUMPETER den Unterschied zwischen Invention und Innovation ausmacht.

spezifischen Beschreibung des Problems eine Lösung gesucht, können die Randbedingungen mit in die Lösungssuche einfließen. Scheinbar innovative Ideen, die jedoch nicht zum bestehenden Teil des Systems passen, werden durch die Bewertung mithilfe der Randbedingungen ausgeschlossen werden. (Bspw. Abbildung 35)

Analyse Schritt für Schritt vertiefen

Die Entscheidung an einer Stelle in die Tiefe zu gehen sollte bewusst gefällt werden. Das Nichtverstehen eines Sachverhaltes ist ein klares Indiz dafür, dass eine Fokussierung und Vertiefung notwendig ist. Jedoch muss sich der Entwickler im gleichen Moment die Frage stellen, ob es nicht auch andere Stellen gibt, die in größerem Ausmaß am Auftreten des Problems beteiligt sind oder größeres Potenzial für eine Verbesserung des Systems bieten.

Um dies zu erreichen, ist es sinnvoll, Funktion und Gestalt gleichzeitig und aufeinander abgestimmt zu entwickeln⁴²², da so eine Struktur der Analyse sichergestellt wird. Eine voneinander losgelöste Aufstellung von Funktion und Gestalt, mit einer späteren Zuweisung⁴²³ führt zu Unübersichtlichkeit und großem Aufwand diese Struktur im Nachhinein herzustellen.

7.2.5 Suche nach Lösungen

Viele Projektbearbeiter und Probanden des Experimentes geben an, dass sie Funktionen auf abstraktem, von der Gestalt losgelöstem Niveau formulieren, um die kreative Lösungssuche zu fördern⁴²⁴. Nur so sei sichergestellt, dass ein möglichst großer Lösungsraum betrachtet wird. Die limitierenden Randbedingungen spielen eine untergeordnete Rolle und können im Nachhinein beherrscht werden. Paradoxer Weise geht dies oft einher mit dem schnellen Übergehen zur Beschreibung einer Lösung auf sehr konkretem Niveau. Es wird dann eine der offenbar besten, im großen Lösungsraum gefundenen Lösungen ausgewählt und direkt umgesetzt⁴²⁵. *Funktioniert* diese Lösung, hat der Projektbearbeiter einen Zufallstreffer gelandet⁴²⁶. Eine Erkundung, geschweige denn eine systematische Erkundung, des a priori groß aufgespannten Lösungsraumes wird nicht durchgeführt.

⁴²² Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Seite 1

⁴²³ Dies wird von ALBERS bereits auf einer übergeordneten Ebene vorgeschlagen. In dem er vorschlägt, Prinzipmodellierung und Gestaltmodellierung nicht weiter getrennt voneinander zu betrachten trägt er derselben Problematik Rechnung, (Albers, 2010)

⁴²⁴ Abschnitt 6.3.4, S.153

⁴²⁵ Siehe hierzu beispielsweise DA 4 in Abschnitt 5.3.2

⁴²⁶ Siehe hierzu auch Abschnitt 7.2.2

Diplomarbeiten⁴²⁷, die eine systematische Eingrenzung des Lösungsraumes, eine gezielte Suche nach Lösungen vorgenommen haben und die bewusst eine Vielfalt an Lösungsvarianten erzeugt haben, verliefen mit weniger Schwierigkeiten als oben genannte. Für die Synthese beim Lösen von Gestaltungsproblemen sollte die Größe des Lösungsraums in enger Anlehnung an das zuvor generierte Systemverständnis festgelegt werden. Nur so kann abgeschätzt werden, ob unter den projektspezifischen Randbedingungen eine zufriedenstellende Lösung erreicht werden kann.

Abstrahieren der konkret beschriebenen Funktionen für die Lösungssuche

Ist ein Problemraum durch die konkrete Beschreibung einer Funktion bestimmt, kann diese Funktion abstrahiert⁴²⁸ werden, sodass für diesen bestimmten Bereich neue Lösungen gesucht werden können. Oftmals liegen auch schon während der Analyse entstandene Lösungen vor, sodass die durch beispielsweise Kreativitätstechniken⁴²⁹ gefundenen Lösungen und die während der Analyse entstandenen gegenübergestellt und bewertet werden können.

7.2.6 Zusammenfassung - Aktivitäten und Konzept von Funktion

In der Aktivitäten-Spalte in Tabelle 15 wird zusammengefasst, welche Aktivitäten in Projekten und Experiment beobachtet wurden. Den Aktivitäten wurden in den 3 Spalten rechts die als sinnvoll bewerteten Bedeutungen, Darstellungen und Formulierungen, die in Abschnitt 7.1 erklärt sind, zugeordnet. Für die freien Felder gibt es keine Empfehlung.

Aktivität	Bedeutung	Darstellung	Formulierung
1. Ziel klären, worum geht es im Projekt, warum gibt es das Projekt	Ziele	Mit Bezug zu den Nachbarsystemen	Konkret, Beschreibung in Sätzen
2. Betrachtungsraum eingrenzen und äußere Einflüsse auf	Funktion im Sinne des Zweck und erwartetem Verhalten	Bezug zu den Nachbarsystemen	Konkret, mit Bezug zu den Nachbarsystemen

⁴²⁷ Beispielsweise DA7, in Abschnitt 5.3.2

⁴²⁸ Mit Abstrahieren ist hier das Ausblenden der Gestalt gemeint, d. h. es wird versucht sich von der bestehenden Lösung zu lösen, beispielsweise im Sinne der VDI 2223

⁴²⁹ DEIGENDESCH hat zum Thema Kreativität, der Bedeutung der Analyse und der Vorbereitung von Kreativitätssitzungen einen wichtigen Beitrag mit dem Schwerpunkt auf die Lösungssuche geleistet, (Deigendesch, 2009)

das System bestimmen			
3. „Funktion“ herausarbeiten, Verständnis erarbeiten, Überblick behalten, Zusammenhänge darstellen	Funktion in Sinne von erwarteten und tatsächlichen Verhalten	Mit Bezug zur Gestalt.	Konkret, Beschreibung in Sätzen mit Bezug zu den Nachbarsystemen
4. Problem beschreiben	Tatsächliches Verhalten	Bezogen auf die Gestalt	Konkret, Beschreibung in Sätzen mit Bezug zu den Nachbarsystemen
5. Lösungen suchen	Funktion im Sinne des erwarteten Verhaltens		Abstrakt für Lösungsneutralität mit Bezug zu den Nachbarsystemen
6. Lösung darstellen	Funktion in Sinne des erwarteten Verhaltens	Mit Bezug zur Gestalt	Konkret, mit Bezug zu den Nachbarsystemen
7. Lösung bewerten	Funktion im Sinne von Zweck im Vergleich zum erwarteten Verhalten	Mit Bezug zur Gestalt	Konkret, mit Bezug zu den Nachbarsystemen
8. Was das Nachbarsystem mit dem betrachteten System macht	Aktionen die der Anwender mit dem System ausführt.	Mit Bezug zur Gestalt	Konkret, mit Bezug zu den Nachbarsystemen
9. Beschreiben was an einer Stelle im System passiert	Physikalische/ chemische Effekte	Bezogen auf die Gestalt	Substantiviertes Verb
10. Beschreiben was das System macht, wenn keine Funktion erfüllt wird	Mittel zum Zweck	Bezogen auf die Gestalt	Konkret, Beschreibung in Sätzen

11. Formales Modell, wenn die Funktionen bekannt sind	Funktion im Sinne des erwarteten Verhaltens	Verb-Nomen Kombination Transformation von Flussgrößen	Aus Katalog mit vorgegebenen Begriffen
12. „Funktion“ eines Systems erklären, Technik erklären, Verständnis erzeugen	Funktion im Sinne von erwartetem Verhalten Funktion im Sinne von Zweck	Mit Bezug zur Gestalt	Konkret, mit Bezug zu den Nachbarsystemen

Tabelle 15: Liste der Aktivitäten und zugeordnetes Funktionskonzept

7.3 Funktion und Gestalt zuordnen mit dem C&C-Ansatz

Als eine erste Zusammenfassung der Auswertung der Projekte, des Experimentes und der beiden vorhergehenden Abschnitte 7.1 und 7.2 zeigt Tabelle 15, dass es in den meisten Fällen sinnvoll ist, die Funktionen auf die Gestalt zu beziehen. In Projekten und im Experiment wurde dies mit dem C&C-Ansatz durchgeführt. Die folgenden Abschnitte beinhalten Vorschläge für die Formalisierung des C&C-Ansatzes hinsichtlich der Bedeutungen, Darstellung und Formulierung von Funktion.

Hierzu werden die Grundhypothesen des C&C-Ansatzes an den Ergebnissen von Projekten und Experiment gespiegelt und in Grundsätze für das Verständnis von Funktion im C&C-Ansatz entwickelt.

7.3.1 Wechselseitige Interaktion in einem einzelnen WFP

Grundhypothese 1 nach ALBERS⁴³⁰ besagt: ein Effekt [z. B. Reibung, Keileffekt, Kraftübertragung, Informationsübertragung, ...] kann nur dann stattfinden, wenn eine Wirkfläche (WF) in Kontakt mit einer zweiten Wirkfläche steht, d. h. ein Wirkflächenpaar (WFP) bildet. Kern der Grundhypothese ist, dass in **einem WFP immer eine wechselseitige Interaktion stattfindet**⁴³¹. Bei dieser Interaktion werden die nicht gegenständlichen⁴³² Funktions-beschreibenden Größen Energie und Information ausgetauscht. Die Funktion-beschreibende Größe Material ist differenziert zu betrachten: Materialfluss ist gegenständlich, gebunden an einen physischen Träger und wird daher in den meisten Fällen nicht durch ein WFP hindurch übertragen⁴³³. Jedoch kann eine Interaktion in einem WFP auch einen Materialfluss hervorrufen⁴³⁴.

Die Fragen, die sich ein C&C-Ansatz Anwender stellen muss, um eine Unterscheidung zu treffen lauten:

- Wird der Materialfluss mithilfe eines benachbarten Teilsystems manipuliert, d. h. hat das benachbarte System eine Wirkung auf das Teilsystem des Materials (bspw. Öl von A nach B leiten als Funktion eines Schlauches)?

Oder:

⁴³⁰ (Albers, et al., 2008b)

⁴³¹ Siehe auch (Albers, et al., 2004)

⁴³² Nicht gegenständlich: Energie und Information haben in keinem Falle eine physische Präsenz, wohingegen Material immer eine solche besitzt: beispielsweise Hydrauliköl als Materialfluss durch eine Pumpe oder Elektronen durch ein Kabel

⁴³³ Ausführliche Erklärung siehe Abschnitt 5.2.1 und Abschnitt 7.1.3

⁴³⁴ Beispielsweise Diffusionsvorgänge

- Ist der Materialfluss Eigenschaft der WFP und LSS , d. h., wird der Materialfluss erst durch das Entstehen eines WFP hervorgerufen (bspw. Elektronenfluss)?

Kann die erste Frage mit *Ja* beantwortet werden, ist das Material (bspw. das Hydrauliköl der Pumpe oder die Papierbögen der Druckmaschine) als eigenständiges Teilsystem anzusehen⁴³⁵, das mit seinen Nachbarsystemen interagiert.

Kann die zweite Frage mit *Ja* beantwortet werden, tritt im WFP ein physikalischer oder chemischer Effekt auf, der Materialübertrag erzeugt (bspw. Kohlenstoffübertragung bei Reibung).

Künstliche WFP, durch die beispielsweise ein Volumenstrom *hindurch*⁴³⁶ fließt oder WFP, die durch *Schneiden* der LSS *entstehen*⁴³⁷, sollten vermieden werden, da diese dem Interaktionscharakter von WFP widersprechen und auch nicht als Effekt betrachtet werden können.

Die Modifikation von ALBERS ET AL. wird demnach durch die Beobachtungen in Projekten und Experiment bestätigt: Es muss zwischen Funktion und Effekt unterschieden werden. Vorgänge in WFP können als **physikalische oder chemische Effekte**⁴³⁸ beschrieben werden.

7.3.2 Zusammenwirken von WFP und LSS als Funktion

Allen Studien wurde die bereits überarbeitete Grundhypothese 2 von ALBERS⁴³⁹ zugrunde gelegt: „Eine Funktion wird nur dann erfüllt, wenn mindestens 2 WFP und eine sie verbindende LSS existieren“. Diese Grundhypothese ist schematisch in Abbildung 74 dargestellt. Mit der Abbildung wird ersichtlich, dass diese Version der Grundhypothese keine explizite Berücksichtigung der Umgebung beinhaltet und damit eine Produkt-bezogene Sicht begünstigt. Funktion sollte jedoch als die Interaktion mit Nachbarsystemen verstanden werden⁴⁴⁰. Dies bedeutet, dass die Umgebungs-bezogene Beschreibung ebenso möglich sein sollte. Somit scheint dieser Ansatz mit einer LSS unvollständig. ALBERS trug der Darstellung der Umgebung im C&C-Ansatz bereits Rechnung, indem er Grundhypothese modifizierte: „Die Funktion eines technischen Systems wird durch mindestens 2 WFP und sie verbindende Leitstützstrukturen erfüllt“⁴⁴¹. Dies ist schematisch in Abbildung

⁴³⁵ Diese Empfehlung bezieht sich auf alle der Arbeit zu Grunde liegenden Studien

⁴³⁶ Siehe beispielsweise Abschnitt 5.2.1

⁴³⁷ Siehe Abschnitt 5.4.3.3, S. 108

⁴³⁸ Siehe hierzu 11. in Tabelle 15

⁴³⁹ Diese Grundhypothese wurde in (Albers, et al., 2007) veröffentlicht. Während der Studien wurde die Grundhypothese überarbeitet (Albers, 2010)

⁴⁴⁰ Siehe Abschnitt 7.1.5

⁴⁴¹ Die aktuelle Definition des Kerngedankens des C&C-Ansatzes aus (Albers, 2010)

75 dargestellt. Die Studien dieser Arbeit wurden vor der Modifikation der Grundhypothese 2 durchgeführt, jedoch zeigt sich durch die Auswertung, dass für die Beschreibung der Bedeutungen von Funktion als Zweck und Funktion als Verhalten stets die Nachbarsysteme mit zu berücksichtigen⁴⁴² sind.

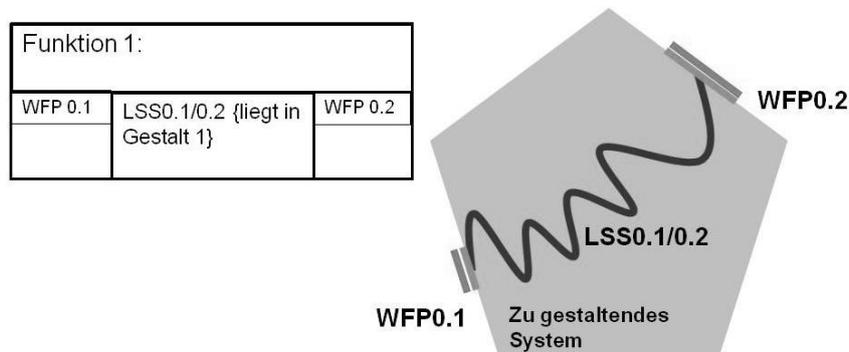


Abbildung 74: C&C-Modell ohne explizite Berücksichtigung der interagierenden Umgebung

Was durch ALBERS mit der Modifikation der Grundhypothese bereits für den C&C-Ansatz begründet und argumentiert wurde, wird mit den in dieser Arbeit herausgearbeiteten unterschiedlichen Auffassungen von Funktion untermauert: Das Verständnis von Funktion als Interaktion mit Nachbarsystemen erfordert die explizite Berücksichtigung der Umgebung. Deshalb sollten die Leitstützstrukturen der Umgebung explizit in einem C&C-Modell dargestellt werden. Abbildung 75 zeigt das Resultat: Die unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion können mit dem C&C-Ansatz dargestellt werden, wenn mindestens zwei WFP, eine diese verbindende LSS, sowie die LSS der Nachbarsysteme beschrieben werden können.

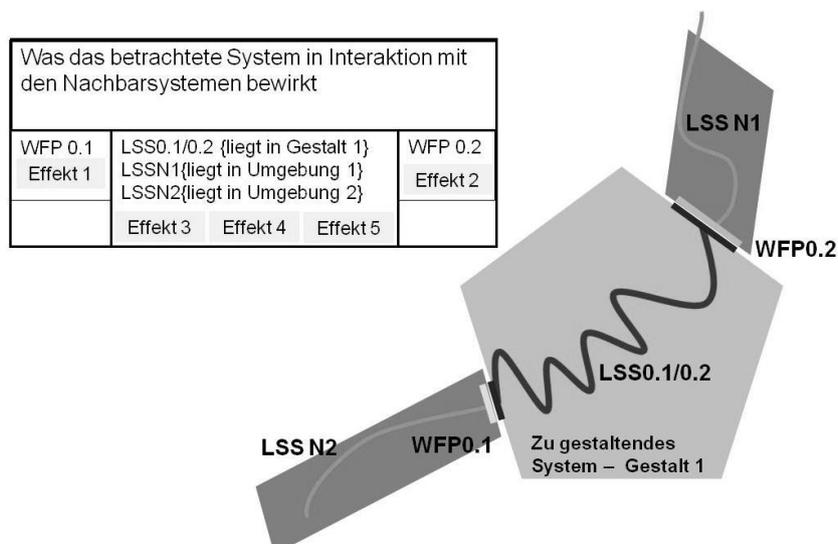


Abbildung 75: C&C-Modell eines zu gestaltenden Systems auf Ebene der Hauptfunktion

⁴⁴² Siehe Abschnitte 7.2, unterschiedliche Bedeutungen sind in unterschiedlichen Aktivitäten notwendig.

Das in Abbildung 75 gezeigte System kann immer in ein übergeordnetes System⁴⁴³ eingeordnet werden, indem seine Funktion mit den Funktionen umgebender Systeme zu einer übergeordneten Funktion zusammengefasst wird. So wird die Fraktalität⁴⁴⁴ des C&C-Ansatzes gewährleistet.

In Abbildung 75 sind Leitstützstrukturen beschrieben, die in der Umgebung des zu gestaltenden Systems liegen. Jedoch weisen sie eine andere Qualität auf, als Leitstützstrukturen, die innerhalb des zu gestaltenden Systems liegen. Sie werden von hier an als **Connectoren** bezeichnet und sind in Abbildung 76 als kreisförmiges Symbol mit Verbindung zur Wirkfläche markiert.

ALBERS⁴⁴⁵ erklärt, dass „die Connectoren alle Einflussgrößen, Parameter, Randbedingungen und deren Vernetzung für die an der Grenze des Systems vorhandenen Wirkflächen beschreiben und beinhalten. Die Bedingungen sind notwendig, um die Funktion des betrachteten Systems korrekt im C&C-Ansatz beschreiben zu können. Connectoren sind eigenständige Elemente. Der Channel (LSS) ist ein aktiv zu gestaltendes Element in der Synthese und ein in der Analyse vollständig zu beschreibendes Element. Im Gegensatz hierzu ist der Connector immer eine, auf die im untersuchten Systembereich liegende, für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante, reduzierte Abbildung der Systemumwelt“.

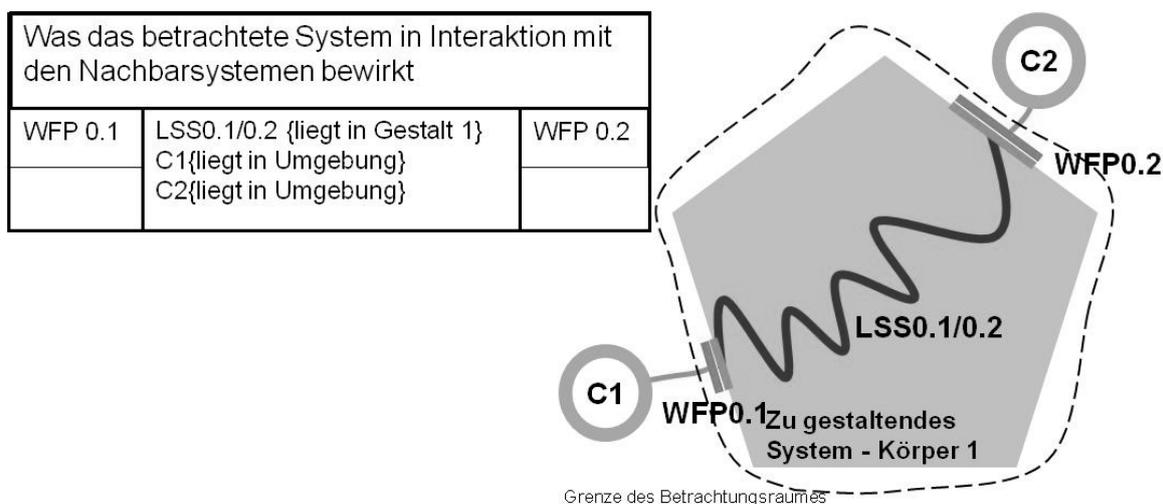


Abbildung 76: C&C-Modell eines technischen Systems mit Connectoren für die Umgebung

⁴⁴³ Dies sind Grundsätze der Systemtheorie, siehe Abschnitt 2.1.2.

⁴⁴⁴ Der C&C-Ansatz ist fraktal, d. h. mit ihm können C&C-Modelle auf jeder Betrachtungsebene auf die gleiche Art und Weise erstellt werden. Diese ist unabhängig davon ob beispielsweise ganze Anlagen oder Vorgänge in einen Reibkontakt betrachtet werden. Siehe auch (Albers, et al., 2008)

⁴⁴⁵ Die Idee, eine Unterscheidung zwischen Leitstützstrukturen und Connectoren vorzunehmen, wurde vom wissenschaftlichen Betreuer der vorliegenden Arbeit PROF. ALBERT ALBERS im Nachgang an Besprechungen zum Inhalt der vorliegenden Arbeit verfasst. Des Weiteren wird der C&C-Ansatz zukünftig als C³-Concept bezeichnet werden. ALBERS schafft hiermit das Contact-Channel-Connector Concept

Im Gegensatz zu den Leitstützstrukturen liegen die Connectoren nicht im betrachteten System somit nicht im Gestaltungsraum. Mit den Connectoren werden alle Bedingungen beschrieben, die für die Erfüllung der Funktion notwendig sind.

Die Connectoren begrenzen die C&C-Modelle technischer Systeme. Jedoch können sie zu Leitstützstruktur werden, wenn es in einem Projekt notwendig ist, das C&C-Modell in die Umgebung zu erweitern.

Das Herausarbeiten der in Connectoren beschriebenen Bedingungen ist eine zentrale Aktivität beim Lösen von Gestaltungsproblemen. In Abschnitt 7.2.6 wurde bereits dargelegt, dass die Aktivitäten *1. Ziel klären, worum geht es im Projekt* und *2. Betrachtungsraum eingrenzen und äußere Einflüsse auf das System bestimmen* von zentraler Bedeutung für einen effektiven Ablauf eines Projektes sind. In diesen Aktivitäten geht es im Speziellen darum, die für die Connectoren relevanten Informationen zu sammeln und zu verifizieren. Bei der Gestaltung des Systems sollten sie hinsichtlich der Verträglichkeit mit der neuen Gestalt überprüft werden.

Im Beispiel der Entwicklung des Betonankers⁴⁴⁶ aus Abschnitt 5.1.3 war die Beschreibung von Connectoren zu beobachten: Dies ist beispielsweise die Streuung der Festigkeit des Betons, in den der Betonanker eingeschlagen wird. Die Festigkeit des Betons bestimmt maßgeblich die Funktion des Betonankers. Im Experiment haben 2 der 20 Probanden⁴⁴⁷ erörtert, dass die Pumpe ebenfalls als Motor verwendet werden kann. Diese Information und ihre Spezifizierung beispielsweise durch die Angabe des Einsatzortes oder auch die Umgebungstemperatur am Einsatzort sind Eigenschaften der Connectoren und sind deshalb wichtiger Bestandteil der Funktion und damit des C&C-Ansatzes.

7.3.3 Darstellung systemischer Zusammenhänge

Im Abschnitt zuvor wurden Grundsätze für die Darstellung eines einzelnen Teilsystems entwickelt. Dieses Teilsystem interagiert mit weiteren, jedoch nicht betrachteten Teilsystemen. In diesem Abschnitt wird die Betrachtung auf C&C-Modelle, die mehr als ein Teilsystem beinhalten ausgedehnt.

⁴⁴⁶Siehe Abschnitt 5.1.3, S. 81, Ziel war es Lösungen zu finden, um das Problem der großen Streuung der Auszugskräfte bei Zertifizierungsversuchen zu lösen.

⁴⁴⁷ Siehe Abschnitt 6.2.2, S. 136

In Abbildung 77 ist schematisch ein technisches System dargestellt, das geschlossen⁴⁴⁸ ist. Auch hier werden 2 WFP und sie verbindende LSS beschrieben. Wenn dieses System jedoch eine Funktion erfüllen soll, dann muss aus den zuvor genannten Gründen eine Wechselwirkung mit der Umgebung bestehen⁴⁴⁹. Diese besteht jedoch nicht. Für die Anwendung des C&C-Ansatzes bedeutet dies, dass technische Systeme, die mit einer derartigen Anordnung von WFP und LSS beschrieben sind, keine Funktion erfüllen.

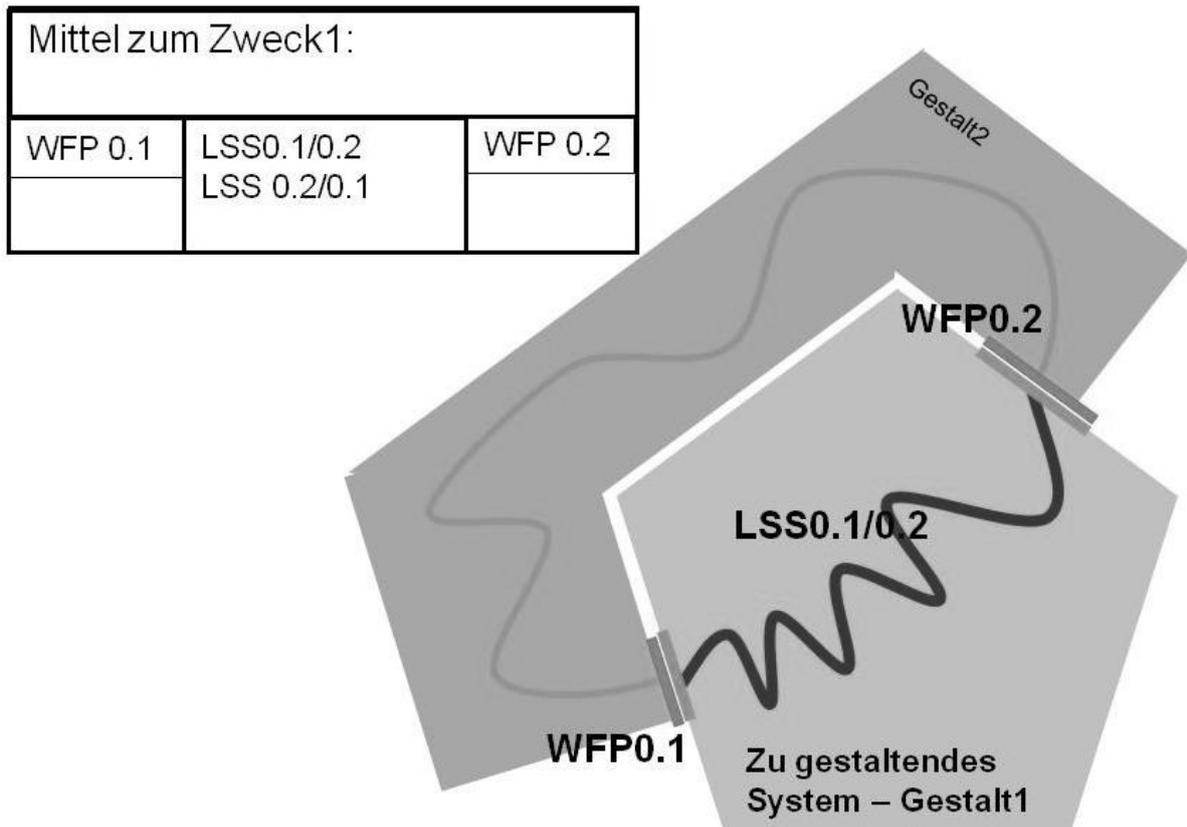


Abbildung 77: C&C-Modell, das ein „Mittel zum Zweck“ darstellt

Diese Anordnung von WFP und LSS war in den Projekten zu beobachten. Der in Abbildung 41 gezeigte zylindrische Pressverband und der in Abbildung 42 gezeigte Betonanker weisen diese Anordnung auf und konnten nicht als *falsch* bewertet werden. Die beschriebenen Systeme interagieren nicht mit der Umgebung. Jedoch ist offensichtlich, dass dort trotzdem etwas in WFP und LSS *passiert*. Diese Anordnung von WFP und LSS erfüllt in dem gezeigten Moment keine Funktion. Sie

⁴⁴⁸ Geschlossene Systeme lassen sich nicht in Nachbarsysteme eingliedern, denn geschlossene Systeme sind theoretische Konstrukte und kommen in der Realität nicht vor, (Oerding, 2009). In den seltensten Fällen werden Systeme isoliert von der Umwelt betrachtet, d. h. C&C-Modelle von Produkten sind in der Regel größer und weisen viele Teilsysteme auf, die in Bezug zu einander stehen.

⁴⁴⁹ Siehe Abschnitt 2.3.4, S.29 und auch Abschnitt 5.2.6, S. 97

ist jedoch Mittel zum Zweck, um zu einem anderen Zeitpunkt, wenn ein weiteres WFP entsteht, das die Anordnung in die Umgebung einbindet, eine Funktion zu erfüllen. Für die in Abbildung 77 gezeigte Art der Anordnung von WFP und LSS wird daher der Begriff **Mittel zum Zweck**⁴⁵⁰ eingeführt.

Diese Art von lokalen⁴⁵¹ Modellen trat immer dann auf, wenn Energie gespeichert wurde oder wenn sich eine Kraft selbst aufhob⁴⁵², d. h. der Kraftfluss lokal geschlossen ist. Die Kraft muss sich *immer abstützen*. Entsteht ein solcher lokaler Kraftausgleich,⁴⁵³ ist dies eine *sinnvolle konstruktive Maßnahme*⁴⁵⁴, denn Kraft muss nicht vom Nachbarsystem *abgefangen* werden. Jedoch wird dieses lokale **Mittel zum Zweck** erst in die Erfüllung einer Funktion eingebunden, wenn ein weiteres WFP entsteht. Deutlicher wird dieser Sachverhalt, wenn der Fluss von Information betrachtet wird. Information ist nur nützlich, wenn sie an einer anderen Stelle verwendet werden kann, d. h., wenn sie mit Nachbarsystemen interagiert.

Ketten und Netze von Teilsystemen

Werden mehrere Teilsysteme und deren Funktionen in einem C&C-Modell beschrieben, hängen diese in einer Kette oder einem Netz zusammen. Abbildung 78 zeigt schematisch ein aus zwei Baugruppen bestehendes System, bei dem drei Teilfunktionen beschrieben sind.

Die LSS0.4/0.5 liegt in beiden zu gestaltenden Systemen, wohingegen LSS0.1/0.2 und LSS0.2/0.3 durch WFP0.2 verbunden sind und jeweils in einem Teilsystem liegen. WFP0.2 ist als Interaktion zwischen Teilsystem 1 und Teilsystem 2 beschrieben. Wenn es beispielsweise notwendig ist, *Übersicht zu behalten*⁴⁵⁵ und *gezielt zu vertiefen*, kann in einem ersten Schritt die LSS0.4/0.5 wie gezeigt als Zusammenfassung von zwei Funktionen zu beschrieben werden. In einem nächsten Schritt kann dann entschieden werden, die LSS0.4/0.5 durch die Beschreibung einer weiteren Interaktion in einem WFP zwischen den Teilsystemen aufzuteilen.

Durch die Auswertung von Projekten⁴⁵⁶ und Experiment⁴⁵⁷ hat sich gezeigt, dass Anwender ohne Begründung zu detailliert modellieren, beispielsweise auf der Ebene

⁴⁵⁰ Die Diskussion über diesen Begriff war noch nicht abgeschlossen.

⁴⁵¹ Lokal bedeutet, eine Isolierte Betrachtung, ohne Anbindung an die Umgebung

⁴⁵² Siehe Projekte in Abschnitt 5.4.4.: Beschreibung des Betonankers und der Welle-Nabe-Verbindung

⁴⁵³ Beispielsweise klemmt die Nabe auf der Welle fest, ohne dass Energie von außen aufgebracht werden muss, siehe Abschnitt 5.4.4.3

⁴⁵⁴ Der „Kraftausgleich“ ist auch als Gestaltungsregel formuliert, siehe Konstruktionslehre nach PAHL und BEITZ

⁴⁵⁵ Aktivitäten sind in Abschnitt 7.2 beschrieben.

⁴⁵⁶ Siehe beispielsweise Abschnitt 5.3.5

von LSS0.1/0.2 und LSS0.2/0.3, ohne dass dies notwendig ist. Der Aufwand für die Modellerstellung wird so unnötig groß und das Modell unübersichtlich.

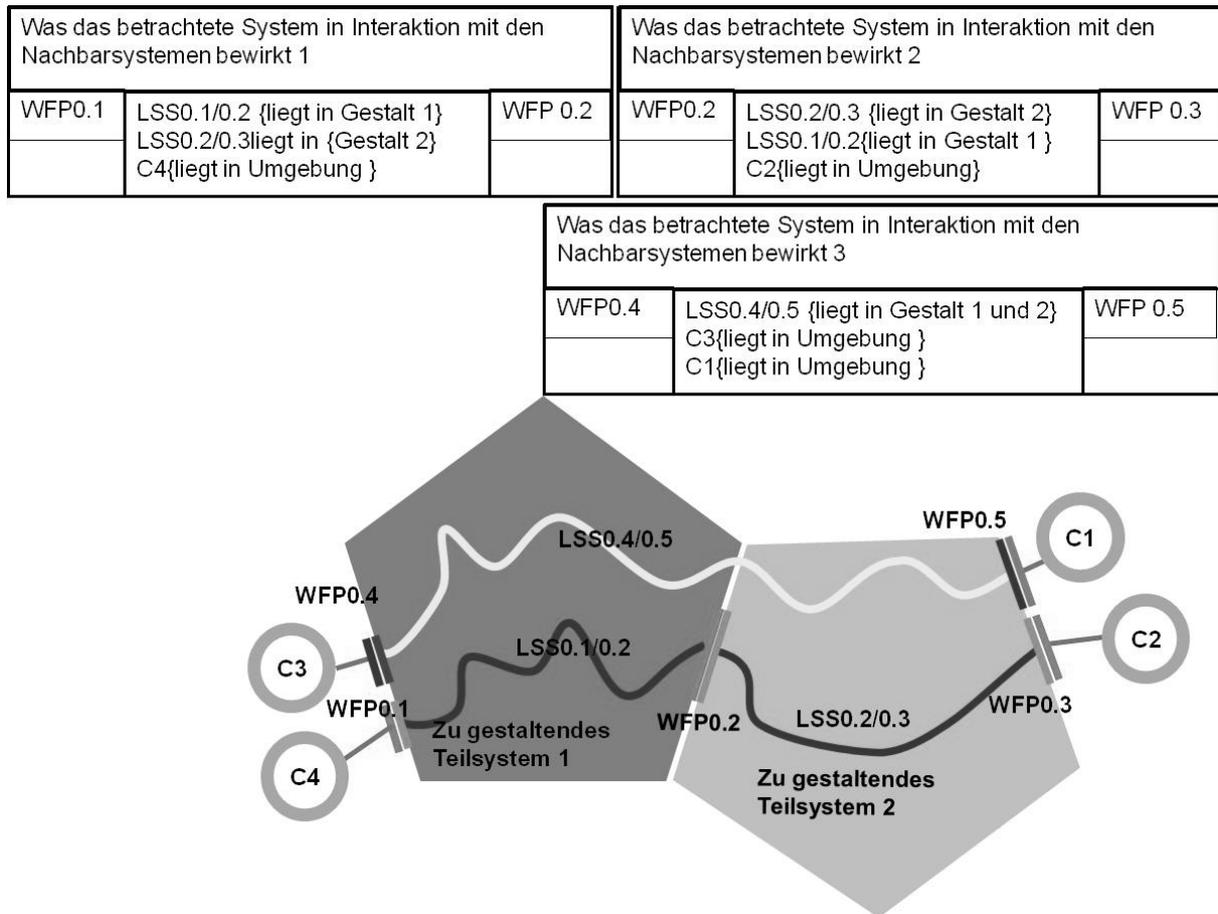


Abbildung 78: Kette von Teilsystemen in einem C&C-Modell

Für die Formalisierung des C&C-Ansatzes ergibt sich hieraus der Ratschlag, der in den Grundhypothesen von ALBERS bereits verankert ist: **Eine LSS ist in keinem Falle mit einem Bauteil oder einer Baugruppe gleich zu setzen.** Wird dies falsch aufgefasst, kommt es dazu, dass der C&C-Ansatz falsch angewandt wird⁴⁵⁸.

Systemgrenzen

Die Systemgrenze beschreibt den Bereich der Gestaltungsraum ist. Die innerhalb liegenden Teilsysteme sind Gestaltungsraum, die außerhalb liegenden Systeme liefern Randbedingungen. Die Systemgrenze ist die Beschreibung eines Betrachtungsraumes. Die Auswertung von Projekten⁴⁵⁹ und Experiment zeigt, dass Probanden und Projektbearbeiter, die sich zwingend an die Konvention *die*

⁴⁵⁷ Siehe Abschnitt 6.2.4 und Abschnitt 6.3.3.1

⁴⁵⁸ Siehe beispielsweise Abschnitt 6.4.2 und in (Eckert, et al., 2010)

⁴⁵⁹ Abschnitt 5.4.5

Systemgrenze auf WFP und LSS zu beziehen nicht sinnvoll ist. Die Systemgrenze sollte als methodisches Hilfsmittel betrachtet werden, die dazu dient den Betrachtungsraum einzugrenzen bzw. auszudehnen, wenn dies notwendig ist, jedoch einspricht ein WFP nicht unbedingt der Systemgrenze. Der Gestaltungsraum kann in gleichem Maße durch die Beschreibung der Hauptfunktion des betrachteten Systems eingegrenzt werden.

7.3.4 Synthese – Lösungen suchen

Das den Studien zugrunde gelegte Vorgehen fordert eine Analyse und Verständnis des Problems, bevor neue Lösungen gesucht werden. Ist das Problem identifiziert, gilt es eine Lösung zu finden, die die Wirkung auf die Umgebung anders oder besser erreichen lässt. Für jede Funktion, die herausgearbeitet und strukturiert wurde, sind die WFP und LSS gestaltbezogen bestimmt. Dem Anwender sollte in einem gewissen Maße ein Verständnis dafür vorliegen, welche Effekte⁴⁶⁰ in den WFP und LSS *passieren* und was das *Ziel seines Handelns* ist.

Synthese bedeutet die Gestalt⁴⁶¹ zu ändern, d. h. andere oder neue Effekte zu erdenken, damit die Wirkung und damit das Verhalten Funktionen zu ändern. Die Synthese findet statt, indem die Gestalt hinterfragt und abstrahiert wird, d. h., die Gestaltinformation wird weggenommen, um je nach Ziel des Projektes nach Lösungen zu suchen. Hierbei kann einerseits die Gestalt geändert werden, d. h., es werden Modifikationen an der Geometrie⁴⁶² unter Beibehaltung der Effekte vorgenommen oder es werden neue Effekte ermittelt, die denselben Zweck, dieselbe Wirkung auf die Umgebung haben.

⁴⁶⁰ Die Effekte sind immer Gestaltbezogen. Ein Effekt ist durch die Gestalt des WFP oder der LSS bestimmt.

⁴⁶¹ Die Gemeinschaft von Form und Stoffeigenschaft eines Körpers, unabhängig davon, ob der Körper substanziell oder nur gedanklich existiert. Die Form beinhaltet hierbei alle geometrischen Körpereigenschaften aber auch die Beschreibung von Quellcode

⁴⁶² In dieser Arbeit wurden tatsächlich nur Geometrie verändert, die Gestaltungsprobleme der Studien und die Aufgabenstellung im Experiment bezogen sich auf rein mechanische Systeme. Deshalb wird an dieser Stelle nur die Aussage für die Änderung der Geometrie getroffen

7.3.5 Zusammenfassung – Grundsätze für den C&C-Ansatz⁴⁶³

Funktion bedeutet Interaktion mit Nachbarsystemen⁴⁶⁴. Ein System kann seine Funktion nur in Wechselwirkung mit benachbarten Systemen erfüllen = ein System kann seine Wirkung nur erzielen, wenn an anderer Stelle auf das System eine Wirkung ausgeübt wird.

Für das Lösen von Gestaltungsproblemen ist es wichtig, dass in der Bedeutung von Funktion zwischen Zweck und Verhalten (erwartetes und tatsächliches) unterschieden wird⁴⁶⁵.

Funktion findet statt und ist nichts Potenzielles (ermöglichen). Dies grenzt Funktion von Zielen ab⁴⁶⁶.

Die Funktion eines technischen Systems wird nur erfüllt, wenn:

- mindestens 2 WFP des betrachteten Systems
- mindestens eine LSS im betrachteten System, die o.g. WFP verbindet und
- mindestens zwei Connectoren an die Umgebung in den o.g. WFP

beschrieben werden können⁴⁶⁷.

Ein C&C-Modell eines technischen Systems beinhaltet eine Beschreibung der Funktion, eine Darstellung der Gestalt und die Zuweisung der Funktion zur Gestalt mittels WFP und LSS. Die WFP und LSS sind jeweils in der Beschreibung der Funktion und der Darstellung der Gestalt markiert⁴⁶⁸.

Mit C&C-M werden Funktionen abgebildet, die entweder den Zweck, das Verhalten oder die Aktionen des Nachbarsystems des zu gestaltenden Systems beschreiben.

Mit dem C&C-Ansatz können „Mittel zum Zweck“⁴⁶⁹ beschrieben werden. Dies sind lokale C&C-Modelle technischer Systeme, die keine Wirkung auf ihre Umgebung haben und somit keine Beschreibung von Funktion darstellen. Erst wenn diese lokalen C&C-Modelle mit einem weiteren WFP in die Umgebung eingebunden wird, wird eine Funktion erfüllt.

⁴⁶³ Diese Grundsätze sind auf Basis der Auswertung der Projekte und des Experiments entstanden, aber auch durch die zahlreichen Diskussionen mit ALBERS und MATTHIESEN

⁴⁶⁴ Begründung siehe Kapitel 7.1, S. 163ff

⁴⁶⁵ Begründung siehe Kapitel 7.1 S. 171ff

⁴⁶⁶ Begründung siehe Kapitel 7.1.2, S. 164ff

⁴⁶⁷ Begründung siehe Kapitel 7.3.2, S. 183ff

⁴⁶⁸ Begründung siehe Kapitel 7.2.6, S. 179ff

⁴⁶⁹ Begründung siehe Kapitel 7.3.3, S.186f

Eine Leitstützstruktur verbindet genau zwei WFP⁴⁷⁰. Die Leitstützstruktur ist in keinem Falle mit einem Bauteil gleichzusetzen.

In einem WFP finden physikalische oder chemische Effekte statt⁴⁷¹.

Der C&C-Ansatz ist fraktal. Mit dem C&C-Ansatz können C&C-Modelle auf jeder Betrachtungsebene auf die gleiche Art und Weise erstellt werden. Die Anzahl der Betrachtungsebenen ist nicht begrenzt.

Ein WFP kann in mehrere WFP aufgeteilt werden.

Eine LSS kann in mehrere WFP und LSS aufgeteilt werden, damit die Teilfunktionen der übergeordneten Funktion abgebildet werden können⁴⁷².

Die Systemgrenze grenzt den Teil des Systems ab, der Gestaltungsraum ist⁴⁷³.

Bei der Synthese mechanischer Systeme werden die geometrischen und stofflichen Eigenschaften der WFP und LSS abstrahiert, sodass ggf. neue Effekte bestimmt werden können. Der Grad der Abstraktion hängt von der Enge der Randbedingungen ab⁴⁷⁴.

⁴⁷⁰ Begründung siehe Kapitel 7.3.2, S. 183 f

⁴⁷¹ Begründung siehe Abschnitt 7.3.1, S. 182f.

⁴⁷² Begründung siehe Abschnitt 7.3.3, S.186

⁴⁷³ Begründung siehe Abschnitt 7.2.4.1, S. 177 und Abschnitt 7.3.3, S. 186f

⁴⁷⁴ Begründung siehe Abschnitt 7.3.4, S.189f

7.4 Unspezifische Faktoren im C&C-Ansatz

Haben die C&C-M unspezifischen Faktoren Auswirkungen auf die Handlungsvorschläge und Definitionen für den C&C-Ansatz: Nein. Die unspezifischen Anwendungsbarrieren beziehen sich auf Grundlagen methodischen Vorgehens und gelten für die Methodenanwendung im Allgemeinen. Treten sie auf, beeinflussen sie die Anwendung des C&C-Ansatzes, jedoch auch die Anwendung anderer Methoden. Diese Ergebnisse entsprechen den im Stand der Forschung aufgeführten (Abschnitt 2.1.3) und bestätigen die von bspw. BIRKHOFER aufgezeigten Ergebnisse der Bimap⁴⁷⁵ Studie.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel mithilfe einer differenzierten Betrachtung der Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion die Anwendbarkeit des C&C-Ansatzes weiter voranzubringen. Deshalb wird der Punkt C&C-Ansatz unspezifische Faktoren Barrieren nachfolgend nicht mehr aufgegriffen. Die beschriebenen⁴⁷⁶ C&C-Ansatz unspezifischen Faktoren werden hier nicht nochmals aufgeführt. Diese Faktoren stehen für sich, es ergeben sich daraus keine weiteren Anforderungen.

⁴⁷⁵ (Geis, et al., 2008)

⁴⁷⁶ Siehe Abschnitt 5.5 und Abschnitt 6.5

8 Handlungsempfehlungen

Zu Beginn eines neuen Projektes steht ein ungelöstes Gestaltungsproblem. Charakteristisches Merkmal für ein solches Gestaltungsproblem ist, dass das Problem unstrukturiert und teilweise unbekannt ist. Es werden lediglich neue Ziele beschrieben. Das in dieser Arbeit beschriebene Beispiel der Entwicklung eines Betonankers⁴⁷⁷ startete mit der Beobachtung, dass die Klemmkraft des Betonankers stark streut (Symptom). Es ist jedoch unklar, warum diese Kraft streut (Ursache).

Derjenige, der die Aufgabe erhält, das Problem zu lösen, wird dies unter den gegebenen Randbedingungen alleine, gemeinsam oder mit Hilfe von anderen Ressourcen durchführen. Er benötigt eine Struktur für sein Vorgehen, die er erlernen muss oder die er schon erlernt hat. In beiden Fällen gilt für die folgenden Handlungsempfehlungen das der Arbeit zugrunde gelegte Vorgehen⁴⁷⁸ mit dem C&C-Ansatz. Eine Übertragung auf andere Ansätze wird nicht vorgenommen.

Die Anforderungen für die differenzierte Entwicklung von Handlungsempfehlungen für Funktionen im C&C-Ansatz sind im Kapitel 7 dargestellt, jedoch sind diese gemäß der Forschungshypothesen aus Kapitel 3 strukturiert. Die Anforderungen werden in diesem Kapitel wieder in den Kontext des der Arbeit zugrunde liegenden Vorgehens gesetzt werden, sodass sie während eines zukünftigen Projektes wirksam werden können.

Zu Beginn der Arbeit wurden die Merkmale erfolgreicher Vorgehensweisen dargelegt⁴⁷⁹. Hierbei wurde immer wieder herausgehoben, dass die *Bestimmung des Problems vor der Lösungssuche* charakteristisch für erfolgreiche Verläufe beim Lösen von Gestaltungsproblemen ist. In Projekten und im Experiment wurde dieser Untersuchungsschwerpunkt ebenfalls gesetzt und dient nun auch hier dazu, die Ergebnisse der Untersuchungen zuzuordnen. Abbildung 79 zeigt die Aktivitäten und die notwendigen Bedeutungen von Funktion, die um die zwei herausgehobenen Aktivitäten *Problem eingrenzen* und *Lösungen suchen* angeordnet sind. Diese Bausteine spiegeln das Ergebnis der Analyse der Projekte und des Experimentes wider.

Die unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion als *Zweck*, *Verhalten* und *Aktionen* sind unterschiedliche Sichtweisen auf das Produkt, deren Verwendung die

⁴⁷⁷ Siehe Abschnitt 5.1.3, S. 81

⁴⁷⁸ Siehe Abschnitt 2.4.3, S. 52

⁴⁷⁹ Siehe Abschnitt 2.2.4, S.19

unterschiedlichen Vorgehensweisen der Anwender ausmacht. Die hierzu abgegrenzten Konstrukte⁴⁸⁰ *Effekte, Wirkungen, Mittel zum Zweck* und *Ziele* sind weitere notwendige Beschreibungen für Teile des zu gestaltenden Systems.

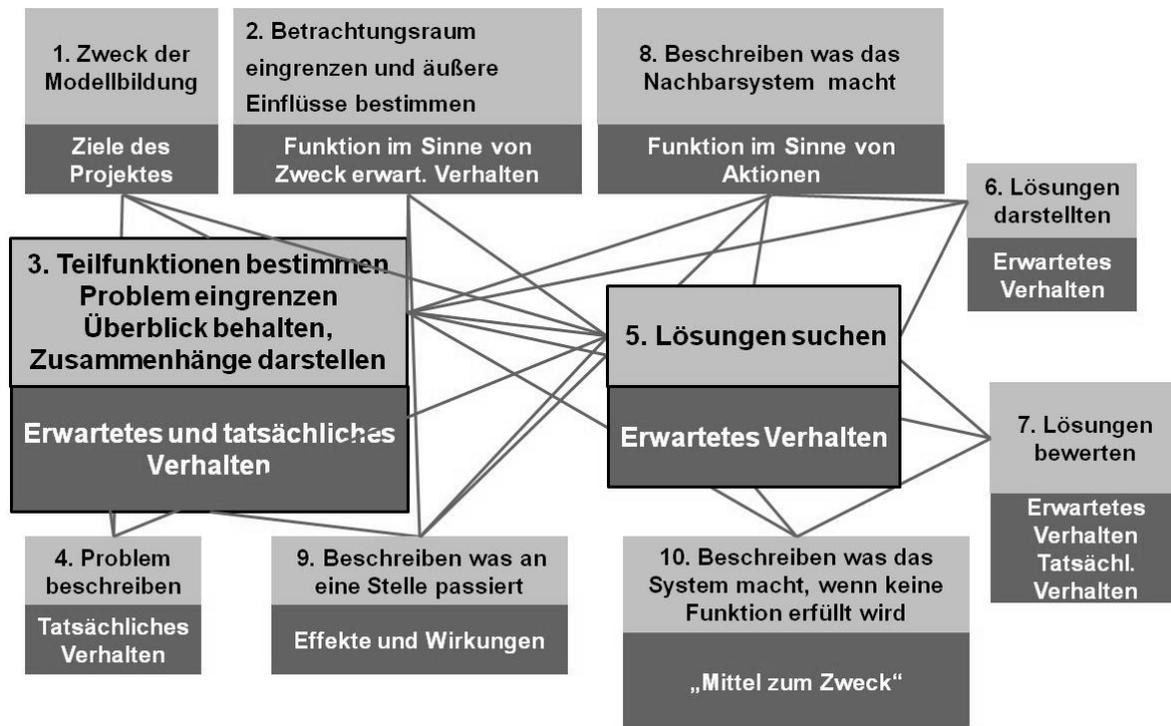


Abbildung 79: Die unterschiedlichen Bedeutungen von

8.1 Zusammenspiel der unterschiedlichen Sichtweisen

Für die Anwendung der oben stehenden Bedeutungen von Funktionen beim Lösen von Gestaltungsproblemen ist es nicht sinnvoll, explizit zwischen ihnen zu unterscheiden. Die Forderung nach Vereinfachung, wenig Theorie und Flexibilität ist Grund zur Annahme, dass die herausgearbeiteten Unterscheidungen nicht an einfache Anwender des C&C-Ansatzes herangetragen werden sollten. Mit der expliziten Unterscheidung der Bedeutungen von Funktion wird für Methodenentwickler und Methodenforscher das Verständnis geschaffen, dass mit Funktion unterschiedliche Perspektiven auf das Produkt beschrieben werden können. Für die Weiterentwicklung des C&C-Ansatzes, aber auch für andere Methoden, die eine Funktionsbeschreibung des Produktes benötigen ist es mit Hinblick auf die spätere Akzeptanz der Methode immanent wichtig, die

⁴⁸⁰ Ein Konstrukt ist ein nicht empirisch erkennbarer Sachverhalt innerhalb einer wissenschaftlichen Theorie. Konstrukte sind somit gedanklicher bzw. theoretischer Natur. Das bedeutet nicht, dass der betreffende Sachverhalt nicht „existiert“, sondern nur, dass er aus anderen, messbaren Sachverhalten (Indikatoren) erschlossen wird, (Wienold, 1995)

Unterscheidungen in den Bedeutungen von Funktion zu berücksichtigen. So wird der geforderten Flexibilität Rechnung⁴⁸¹ getragen und vermieden, beschränkenden Konventionen zum Opfer zu fallen.

Um die Anwender nicht mit theoretischem Ballast⁴⁸² zu überfrachten wird vorgeschlagen in der praktischen Anwendung des C&C-Ansatzes niemals den Versuch zu unternehmen, die einzelnen Bedeutungen von Funktion explizit und eindeutig herauszuarbeiten. Es sollen nicht Empfehlung gegeben werden, die folgendermaßen lauten: „In der Aktivität Y benötigen Sie diese Bedeutung X von Funktion, also formulieren Sie die Funktion auf die Weise Z“. Die Unterschiede in der Bedeutung von Funktion sind zu einem nicht unerheblichen Teil rein in der Sprache begründet. Die Unterscheidung hängt zum Teil von der Wahl einzelner Worte⁴⁸³ ab. Des Weiteren steht mit dem C&C-Ansatz ein Mittel bereit, um eine Funktion mit mindestens zwei WFP und sie verbindenden LSS auf der Gestalt zu modellieren und somit weniger mehrdeutig darzustellen.

Dem folgenden Vorschlag liegt zugrunde, die explizite Nennung unterschiedlicher Bedeutungen von Funktion mit konkreten Fragen zu ersetzen. Die Fragen adressieren denjenigen Sachverhalt, der mit der Beschreibung von Funktion erklärt und festgehalten werden soll. Es wird beispielsweise vorgeschlagen nicht mehr die Frage zu stellen *Was ist die Funktion im Sinne des Zweckes*, sondern es soll die Frage *Wozu soll das System geschaffen werden?* gestellt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Aktivitäten, die beobachtet wurden⁴⁸⁴ und zeigt, wie das Problem der expliziten Unterscheidung der Bedeutung der Funktionen beim Lösen von Gestaltungsproblemen umgangen werden kann.

⁴⁸¹ Abschnitt 2.1.3, Seite 13

⁴⁸² (Geis, et al., 2008), (Reinicke, 2004), Abschnitt 2.1.3

⁴⁸³ Oftmals entscheiden Nuancen in Worten, ob nun beispielsweise die Teleologie oder das Verhalten eines Produktes beschrieben wird. Wenn in Stand der Forschung beschrieben wird, dass die Definition von Abstraktionen auf unterschiedlichen Ebenen eine Diskretisierung des Raumes zwischen Zielen und Gestalt bewirkt, so wird mit der Beschreibung der unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion mit Hilfe der Sprache deutlich, dass der Übergang kontinuierlich ist und die diskreten Schritt wesentliche Aspekte verhüllen (Vermaas, 2010)

⁴⁸⁴ Dies sind die Aktivitäten, die beim Lösen von Gestaltungsproblemen angetroffen werden, siehe Abschnitt 7.2.6.

Aktivität	Frage
1. Ziel klären, worum geht es im Projekt, warum gibt es das Projekt	Warum und wozu sind wir hier? Was wollen wir erreichen? Warum bilden wir das Modell des technischen Systems?
2. Betrachtungsraum eingrenzen und äußere Einflüsse auf das System bestimmen	Wofür ist dieses System gemacht und durch welche WFP interagiert es mit seiner Umgebung?
3.1 „Funktion“ herausarbeiten, das Verständnis selbst erarbeiten, Überblick behalten, Zusammenhänge darstellen Struktur (räumlich) der Analyse aufbauen, um die möglichen Ursachen für das Problem zu ordnen	Welche 3-5 Teilfunktionen ⁴⁸⁵ tragen zur Erfüllung der Hauptfunktion bei und wie hängen diese durch die WFP und LSS zusammen? Was muss im System geschehen, damit die Hauptfunktion erreicht wird?
3.2 „Funktion“ herausarbeiten, das Verständnis selbst erarbeiten, Überblick behalten, Zusammenhänge darstellen Struktur (zeitlich) der Analyse aufbauen, um die möglichen Ursachen für das Problem zu ordnen	Welche 3-5 Zustände von Teilfunktionen laufen nacheinander ab? Wann entsteht eine WFP und wann fällt eines weg?
4. Problem beschreiben, Hypothesen für die Ursachen des Problems aufstellen und verifizieren	An welchen Stellen kann eine Ursache für unser Problem liegen? Was passiert in den WFP und LSS? Ist diese eine Ursache für unser Problem?
5. Lösungen suchen	Wie können wir dieses Problem beheben?
6. Lösung darstellen	Wie löst diese Lösung das Problem?
7. Lösung bewerten	Entspricht diese Lösung unseren Zielen und wie sicher löst sie das Problem?
8. Was das Nachbarsystem mit dem betrachteten System macht	Bildet das System zu einem anderen Zeitpunkt WFP mit einem anderen System oder gibt es zu einem anderen

⁴⁸⁵ Mehr als 5 Teilfunktionen sollen für eine übergeordnete Funktion nicht bestimmt werden, da das Modell sonst unübersichtlich wird. Siehe Abschnitt 7.2.1

Ereignisse finden, die zu einem früheren Zeitpunkt als der Betrieb des Systems (Funktion im Sinne von Zweck) Ursache für das Problem sein können	Zeitpunkt WF die WFP in Interaktion mit dem System bilden?
9. Beschreiben was an einer Stelle im System passiert.	Was passiert in diesem WFP? Was passiert in dieser LSS?
10. Beschreiben was das System macht, wenn keine Funktion erfüllt wird	Was passiert in dieser Anordnung von WFP und LSS? Wozu wird diese Anordnung zu einem anderen Zeitpunkt verwendet? Wo bilden sich zu einem anderen Zeitpunkt WFP und LSS?

Tabelle 16: Aktivitäten beim Lösen von Gestaltungsproblemen und zugeordnete Fragen

Für alle diese Fragen gelten die Anforderungen aus Kapitel 7.

Die Nummerierung der Aktivitäten entspricht einer zeitlichen Reihenfolge in der diese auftreten können und in der somit die Fragen gestellt werden können. Die Auswertung der Projekte und des Experimentes zeigt jedoch, dass die hier dargestellte Reihenfolge niemals genauso auftreten wird. Jede Frage wird mehrmals gestellt werden müssen. Das Vorgehen ist iterativ und individuell⁴⁸⁶.

8.2 Hypothesen, Maßnahmen, Fakten

Die oben beschriebenen Fragen führen zu Ergebnissen, die für die Eingrenzung des Problems und für die Suche nach Lösungen bedeutsam sind. Auf jeder Betrachtungsebene sollte ein C&C-Modell nicht mehr als 5 Teilfunktionen beinhalten⁴⁸⁷. Dennoch wird bei einem komplexen Gestaltungsproblem das C&C-Modell schnell groß, da sehr viele Informationen bewertet werden. Des Weiteren gilt es, die Informationen strukturiert festzuhalten und für den weiteren Verlauf zu erweitern, da aus dem Modell Maßnahmen für das weitere Vorgehen abgeleitet werden.

Zu Beginn eines Projektes werden Hypothesen für mögliche Ursachen des Problems aufgestellt. Anschließend sollten diese verifiziert werden. Die Verifizierung der Hypothesen stellt den Projektfortschritt der Problemeingrenzung dar. Ist das Problem

⁴⁸⁶ ALBERS begründet dies bereit mit der Entwicklung des iPeM, (Albers, 2010). Dort wird der Produktentstehungsprozess als eine individuelle Abfolge von Aktivitäten der Produktentstehung und Aktivitäten der Problemlösung angesehen.

⁴⁸⁷ Siehe Abschnitt 5.3.5 und 6.3.2

ausreichend eingegrenzt,⁴⁸⁸ kann die Lösungssuche beginnen. Erst am Ende eines Projektes steht wirklich fest, ob das Problem wirklich gelöst ist. Die funktionierende Lösung verifiziert eine richtige Hypothese zur Ursache des Problems. So entstehen im Lauf eines Projektes Informationen unterschiedlicher Güte mit unterschiedlichen Randbedingungen. Es hat sich als nützlich herausgestellt, die unterschiedlichen Qualitäten von Informationen und die Maßnahmen zu deren Bewertung über die WFP, LSS und Anbindungen in Bezug zueinander zu setzen und in Hypothesen, Maßnahmen und Fakten einzuteilen.

Abbildung 80 zeigt beispielhaft die Aufteilung.

<p>Hypothesen: Funktion 1 wird nicht erfüllt, weil in WFP0.1 eine ungleichmäßige Flächenpressung auftritt</p>	<p>Maßnahmen zur Veri- Falsifizierung:</p> <p>Versuch1: WFP0.1 in einem Versuch verschweißen, dann besteht Sicherheit</p>	<p>Fakten: In WFP0.2 tritt kein Problem auf</p>
<p>Problemeingrenzung: Wenn Versuch1 Hypothese1 bestätigt verursacht die ungleichmäßige Flächenpressung, die frühzeitige Ermüdung in LSS0.1/0.2</p>		
<p>Lösungen: WFP0.1 als Pressverband gestalten</p>		

Abbildung 80: Vorlage für Hypothesen, Fakten und Maßnahmen in Anlehnung an SPALTEN⁴⁸⁹

Für jedes Teilsystem können dem Ziel entsprechend Hypothesen aufgestellt werden, die das Problem beschreiben. Die Hypothesen sollten immer den WFP, LSS und Anbindungen des C&C-Modells zugeordnet werden, damit auch die Hypothesen einen Bezug zur Funktion und zur Gestalt erhalten. Die Hypothesen sollten sich auf die Ebene der Funktion beziehen, auf die mindestens 2 WFP und sie verbindende LSS. Sind die Hypothesen nur mit Schwierigkeiten auf einen Teil des betrachteten Systems zu beziehen, ist dies ein Hinweis, dass die Betrachtung an dieser Stelle verfeinert werden sollte.

⁴⁸⁸ Siehe Abschnitt 5.3.4, S. 103

⁴⁸⁹ (Albers, et al., 2005), (Saak, 2007)

Um Hypothesen zu verifizieren, können Maßnahmen bestimmt werden. Die Maßnahmen können unterschiedlicher Natur sein. Einerseits kann die Verifizierung sehr einfach, wenig Ressourcen intensiv durch die Befragung eines Experten oder durch Nachlesen in einem Buch erfolgen. Es kann, je nach Art des Produktes und Umfang des Projektes aber auch notwendig sein, eine Simulation durchzuführen oder einen Prüfstand zu entwickeln, um das tatsächliche Verhalten des Systems im Hinblick auf das erwartete Verhalten zu bewerten. Verifizierte Hypothesen können als Fakten festgehalten werden. Gesicherte Sachverhalte können grundsätzlich als Fakten festgehalten werden. Die Ordnung der Information sollte auch für Maßnahmen und Fakten über eine Zuordnung zu WFP und LSS erfolgen.

9 Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit stand die Frage, wie die Anwendung des C&C-Ansatzes zum Lösen von Gestaltungsproblemen verbessert werden kann. Hierbei war auffällig, dass die Anwender Schwierigkeiten im Umgang mit Funktion haben. Somit wurde der Fokus dieser Arbeit auf die folgenden Fragen gelegt: Warum haben Ingenieure und Studierende Schwierigkeiten Funktionen zu formulieren und auf die Gestalt zu beziehen? Wenn die Darstellung von Funktion gelang, war die Frage: Warum sind die Darstellungen von Funktion immer unterschiedlich?

Nach der Analyse des Standes der Forschung wurden Forschungsfragen in vier Bereichen aufgeworfen und beantwortet:

Die Studierenden und Ingenieure haben diese Schwierigkeiten mit Funktion umzugehen, weil Funktion in unterschiedlichem Kontext auf unterschiedliche Art und Weise verwendet wird. Deshalb wird Funktion mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt. Da dieser Unterschiedlichkeit nur theoretisch Rechnung getragen wird, entwickeln Studierende und Ingenieure individuelle Auffassungen von Funktion, die für ihre Anwendungen nützlich und sinnvoll sind. Sind die Anwender dazu aufgefordert diese Auffassung in anderen Aktivitäten anzuwenden, scheitern sie oder müssen Aufwand betreiben, um ihre Auffassung anzupassen. Zusätzlich erschwerend kommt hinzu, dass die unterschiedlichen Auffassungen nicht immer an die Bedeutung geknüpft sind, sondern an Konventionen zur Darstellung oder der Formulierung. Als berühmtes Beispiel sei hier die Konvention Funktion in einer Blackbox darzustellen, genannt. Diese Darstellung ist jedoch nur für Aktivitäten geeignet, in denen eine lösungsneutrale Beschreibung notwendig ist.

Konsequenz der Untersuchungen in dieser Arbeit ist, dass Funktionen grundsätzlich als Beschreibung der Interaktion des betrachteten Systems mit Nachbarsystemen aufgefasst werden sollte. Des Weiteren wird in dieser Arbeit vorgeschlagen Funktion als Konzept⁴⁹⁰ zu betrachten, das sich aus der Bedeutung, der Darstellung und der Formulierung zusammensetzt.

Jedoch erfordert das Lösen von Gestaltungsproblemen unterschiedliche Aktivitäten, die mit unterschiedlich ausgeprägten Konzepten von Funktion einher gehen. Je nachdem welche Problemstellung und welche Ziele in einem Projekt verfolgt werden, je nach dem, welchen Hintergrund der bearbeitende Produktentwickler hat, werden

⁴⁹⁰ Siehe Abschnitt 7.1

unterschiedliche Kombinationen von Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktionen notwendig, um das Verständnis für das System zu erarbeiten, darzustellen und Lösungen zu finden. Es werden unterschiedliche Aktivitäten durchgeführt, deren Reihenfolge und zeitliche Ausdehnung jedoch projektspezifisch sind. In dieser Arbeit wurden die unterschiedlich ausgeprägten Konzepte von Funktion den beobachteten, notwendigen und sinnvollen Aktivitäten zugeordnet⁴⁹¹.

Für die Darstellung von Funktion mit dem C&C-Ansatz können diese Ergebnisse herangezogen werden, um die Ausgangssituation weiterzuentwickeln. Funktion sollte auch im C&C-Ansatz als Interaktion von Systemen verstanden werden. Der Interaktionscharakter ist ein Kernelement, des von ALBERS entwickelten Ansatzes. In WFP und LSS finden physikalische und chemische Effekte statt. Dies bezieht sich auf die Interaktion in einem einzelnen WFP, vor allem aber auch auf die Interaktion mit den Nachbarsystemen, die grundsätzlich auch explizit beschrieben werden sollten⁴⁹². Die von ALBERS hierzu aufgestellten Hypothesen konnten durch diese Arbeit empirisch untermauert werden. Mit der Auffassung von Funktion als Interaktion werden im C&C-Ansatz Funktion im Sinne von Zweck und Funktion im Sinne von erwartetem und tatsächlichem Verhalten beschrieben werden. Zusätzlich können Aktionen benachbarter Systeme als Funktion aufgefasst werden und als Wechselwirkung mit dem zu gestaltenden System beschrieben werden. Erst durch die Darstellung von Systemen mit dem C&C-Ansatz konnte eine Anordnung von WFP und LSS identifiziert werden, für die bisher keine Unterscheidung zu Funktion vorgenommen wurde. Diese Anordnungen sind lokale C&C-Modelle⁴⁹³ technischer Systeme, die keine Wirkung auf ihre Umgebung haben und somit keine Beschreibung von Funktion darstellen. Diese Anordnungen von WFP und LSS werden als „Mittel zum Zweck“ bezeichnet, da diese Anordnung erst zur Erfüllung einer Funktion beiträgt, wenn ein weiteres WFP entsteht, das diese Anordnung mit der Umgebung verbindet.

Für die Anwendung der hier differenziert entwickelten Bedeutungen, Darstellungen und Formulierungen von Funktion ist es jedoch nicht sinnvoll, explizit zwischen den unterschiedlichen Bedeutungen von Funktion zu unterscheiden. Besser ist, die unterschiedlichen Funktionen mit konkreten Fragen zu adressieren, die entsprechend der angetroffenen Aktivitäten strukturiert sind⁴⁹⁴. Diese Konsequenzen für die Grundsätze unterliegen jedoch einer weiteren Bedingung. Sie werden nur

⁴⁹¹ Siehe Abschnitt 7.2

⁴⁹² Siehe Abschnitt 7.3.2

⁴⁹³ Siehe Abschnitt 7.3.3

⁴⁹⁴ Siehe Abschnitt 8.1

wirksam, wenn einige Grundregeln methodischen Vorgehens beachtet werden. Da die hier dargestellten Handlungsvorschläge heuristischer Natur sind, werden sie den Anwender das Ziel in keinem Falle mit 100%iger Sicherheit erreichen lassen. Dies war niemals das Ziel der Entwicklung des C&C-Ansatzes und wird es auch nicht werden. Der Anwender wird immer aufgefordert sein, sich seine Position im Prozess bewusst zu machen und seine Handlungen unter Beachtung der hier vorgeschlagenen Handlungsvorschläge auszurichten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf der Auswertung von Projekten und einem Experiment im Anwendungsbereich *Lösen von Gestaltungsproblemen*. Im Zentrum dieser Studien standen immer vorrangig mechanische Systeme. In vielen Arbeiten zeigen ALBERS UND SEINE MITARBEITER jedoch schon, dass der C&C-Ansatz übertragbar ist auf weitere Gebiete⁴⁹⁵. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Bereiche ist sinnvoll und drängt sich auf. Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten ist es auch diese Übertragung und die Anwendung durch eine Vielzahl von Personen zu validieren. Diese Arbeit zeigt einen Ausschnitt⁴⁹⁶ der Forschungsaktivitäten am C&C-Ansatz. Die weitere Erforschung des Begriffs, des Konstrukts oder der Verwendung von Funktion gilt es in der Zukunft weiter zu vertiefen. Zahlreiche Methoden in der Produktentwicklung bauen auf Modelle technischer Systeme auf, die Funktionen oder Funktionenstrukturen des Systems darstellen. Es drängt sich somit die Frage auf, ob in anderen Anwendungsbereiche außerhalb des C&C-Ansatzes ähnliche Variationen in der Auffassung der Anwender bestehen und ob der C&C-Ansatz in diesem Zusammenhang nicht die Lösung ist, um mit der Vieldeutigkeit der abstrakten Beschreibungen umzugehen.

⁴⁹⁵ Siehe Abschnitt 2.4.2

⁴⁹⁶ Siehe Abschnitt 1.2 und 4.2

10 Literaturverzeichnis

- Albers, A. (2010). Five Hypothesis about Product Engineering. *Proceedings of the TMCE*. Ancona: Horvath, Rusak, Mandorli.
- Albers, A., & Alink, T. (2007). Support of design engineering activity for a systematic improvement of products. *Proceedings of the Cirp Design Seminar. The Future of Product Development*. Berlin, Germany.
- Albers, A., & Düser, T. (2010b). A new Process for configuration and application of complex validation environments using the vehicle-in-the-loop at the roller test bench. *Proceedings of the 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. November 12-18, 2010, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Albers, A., & Matthiesen, S. (1999). Maschinenbau im Informationszeitalter. *44th International Scientific Colloquium September 20 – 23*. Technical University of Ilmenau.
- Albers, A., & Matthiesen, S. (2002). *Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell, Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zur Analyse und Synthese technischer Systeme, Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag Düsseldorf.
- Albers, A., & Meoboldt, J. (2005). SPALTEN - Problem Solving Methodology in the product development. *Proceeding of the 15th International Conference on Engineering Design ICED 05*. Melbourne, Australia.
- Albers, A., Alink, T., & Deigendesch, T. (2008c). Support of design engineering activity – The Contact and Channel Model (C&CM) in the context of problem solving and the role of modeling. *Proceedings of the International DesignConference 2008*. Dubrovnik, Croatia.
- Albers, A., Alink, T., & Oerding, J. (2007c). Unterstützung der kreativen Phasen im Produktentwicklungsprozess mit dem Elementmodell C&CM. *Kolloquium Konstruktionstechnik*. Dresden.
- Albers, A., Alink, T., & Oerding, J. (2010). Abstract objectives can become more tangible with the Contact and Channel Modell (C&CM). *Proceedings of the Cirp Design Conference*. Nantes, France.
- Albers, A., Alink, T., & Ohmer, M. (2009b). Accessibility of the innovative principles to further levels of abstraction in. *European TRIZ association: Proceedings of the TRIZ Future Conference*. Timisoara.
- Albers, A., Alink, T., Thau, S., & Matthiesen, S. (2008). Support of design engineering activity through C&CM - temporal decomposition of design problems. *Proceedings of the TMCE Symposium*. Izmi, Turkey.
- Albers, A., Alink, T., Thau, S., & Matthiesen, S. (2008b). Support of system analyses and improvement in industrial design through the Contact & Channel Model. *Proceedings of the International Design Conference Design2008*. Dubrovnik, Croatia.
- Albers, A., Birkhofer, H., & Matthiesen, S. (1999b). Neue Ansätze in der Maschinenkonstruktionslehre. S. 168-183.

- Albers, A., Burkardt, N., & Ohmer, M. (2004). The Pair Character of Working Surfaces - Significant Elements of the Contact & Channel Model C&CM. *14th International CIRP Design Seminar, Design in the global village*. Cairo, Egypt.
- Albers, A., Burkardt, N., & Ohmer, M. (2004b). Principles of Design on the abstract Level of the Contact and Channel Model. *Proceedings of the TMCE Symposium*. Lausanne, Switzerland.
- Albers, A., Burkardt, N., & Ohmer, M. (2005). How C&CM can help the Designer to find the right principles. *Proceedings of the CIRP Design Seminar 2005, New Trends in Engineering Design*, (S. 232-241). Shanghai, China.
- Albers, A., Burkardt, N., Matthiesen, S., & Schweinberger, D. (2000). "The Karlsruhe Model"- A Successful Approach to an Academic Education in Industrial Product Development. *Proceedings of the International Conference on Engineering and Product Design Education*. Sussex, UK.
- Albers, A., Enkler, H.-G., & Ottnad, J. (2009b). Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse – Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact and Channel Model. *6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*.
- Albers, A., Matthiesen, S., & Ohmer, M. (2003). Evaluation of the Element Model 'Working Surface Pairs & Channel and Support Structures'. *Proceeding of International CIRP Design Seminar 2003*, (S. 352-362). Grenoble, France.
- Albers, A., Matthiesen, S., & Ohmer, M. (2003b). Alterations in students' ability to solve problems by introduction of the Element Model C&CM into the Karlsruhe Education Model for Industrial Product Development KaLeP. *14th International Conference on Engineering Design ICED03, August 19th-21st*. Stockholm, Schweden: Design Society.
- Albers, A., Matthiesen, S., & Ohmer, M. (2003c). An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems. *14th International Conference on Engineering Design ICED03, August 19th-21st*. Stockholm.
- Alink, T., Eckert, C., Ruckpaul, A., & Albers, A. (2010). Different function breakdowns for one existing. *International Conference on Design Computing and Cognition DCC2010*. Stuttgart: John Gero.
- Asimov, W. (1962). *Introduction into design*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Behrendt, M. (2009). *Entwicklung eines Systemtribometers mit Abbildung mehrachsiger instationärer Beanspruchungskollektive zur Analyse von Reibung und Verschleiß im Mischreibungsgebiet im Kontext nasslaufender Umschlingungs-CVT* (Bd. Forschungsberichte des Instituts für Produktentwicklung Nr. 36). Karlsruher Institut für Technologie.
- Bender, B. (Vol. 14 2003). Task design and task analysis for empirical studies into design activity. *Journal of Engineering Design, Vol.14, S. 399 - 408, S. 399-408, No. 4*.
- Bender, B. (2004). *Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung* (Bd. Dissertation). Berlin: Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin.
- Blessing, L. (1994). *A process-based approach to computer-supported engineering design*. Cambridge UK: Black Bear Press.
- Börsting, P., Keller, R., Alink, T., Eckert, C., & Clarkson, P. (2008). The relationship between functions and requirements for an improved detection of component linkages. *Proceedings of the*

- International Design Conference 2008*. Dubrovnik, Croatia.
- Bortz, J., & Döring, N. (2002). *Forschungsmethoden für Human- und Sozialwissenschaftler, 3te Auflage*. Berlin.
- Brown, D., & Blessing, L. (2005). The Relationship between Function and Affordance. *Proceedings of the ASME 2005 IDETC/CIE Conference, September 24-28, 2005,, USA*. Long Beach, California.
- Bucciarelli, L. (1996). *Designing Engineers*. Boston: MIT Press.
- Chandrasekaran, B., & Josephson, J. (2000). Function in device representation. *Engineering with Computers*. Springer-Verlag; London;.
- Cicourel, A. (1974). *Messung und Methode in der Soziologie*. Frankfurt: Suhrkamp.
- Crilly, N., Good, D., Matravers, D., & Clarkson, P. (2008). Design as communication: exploring the validity and utility of relating intention to interpretation. *Design Studies*, 29(425-457).
- Cross, N. (1989). *Engineering Design Methods*. Chichester : John Wiley & Sons.
- Deigendesch, T. (2009). *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel* (Bde. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung Nr. 41). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Deng, Y. (2002). Function and Behavior Representation in Conceptual Mechanical Design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*,(16, S. 343-362).
- Deubzer, F., & Lindemann, U. (2009). Networked Modelling - Use and interaction of product models and methods during analysis and synthesis. *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design ICED09*. Stanford, US.
- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Eckert, C. M., Clarkson, P. J., & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*(15(1), 1-21).
- Eckert, C., Albers, A., & Ohmer, M. (2004b). Engineering in a different way: A cognitive perspective on the contact and channel model approach. *Third international Conference on Visual and Spatial Reasoning in Design*. MIT Cambridge, USA.
- Eckert, C., Alink, T., & Albers, A. (2010). Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction. *International Design Conference Design 17.-20. Mai*. Dubrovnik, Kroatien: eingereicht, befindet sich im Review.
- Ehrlenspiel, K. (2003). *Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, Wien: Hanser Fachbuchverlag.
- Enkler, H.-G. (2010). *Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme* (Bde. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung Nr. 44). Karlsruher Institut fürTechnologie.
- Erden, M., Komoto, H., van Beek, T., D'Amelio, V., Echavarria, E., & Tomiyama, T. (2008). A review of function modelling: approaches and applications. *Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 22.
- Ericson, K. A., & Simon, H. (1993). *Ericsson, K. A.; Simon, H.: Protocol analysis: verbal reports as*

- data*. Cambridge, Massachusett: The MIT Press.
- Ersoy, M. (1975). *Wirkfläche und Wirkraum: Ausgangselemente zum Ermitteln der Gestalt beim rechnergestützten Konstruieren*. Braunschweig: Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Franke, H. -J. (1995). *Bilder und Begriffe beim konstruktiven Denken - Diskussionen und Ergebnisse eines Workshops*. VDI Berichte Nr.: 1169.
- Frankenberger, E., Birkhofer, H., & Badke-Schaub, P. (1998). *Designers - The Key to Successful Product Development*. London: Springer Verlag.
- Frigg, R. (2003). *Re-representing scientific representation* (Bd. PhD thesis). London: London School of Economics.
- Geis, C., Bierhals, R., Schuster, I., Badke-Schaub, P., & Birkhofer, H. (2008). Methods in practice – a study on transfer of design methods. *Proceedings of the International Design Conference 2008*, (S. published on CD, 10 pages, 2008). Dubrovnik, Croatia.
- Gero, J. (Nr.4. Vol.11 1990). Design Prototypes: A knowledge representation schema for design. *Artificial Intelligence Magazine*.
- Gero, J., & Kannengiesser. (2002). The Situated Function-Behaviour-Structure Framework. *Artificial Intelligence in Design*(pp 89–104).
- Hacker, W. (1997). Improving engineering design - contributions of cognitive Ergonomics. *Ergonomics*, 40(10,1088 ± 1096).
- Hacker, W. (2002). *Denken in der Produktentwicklung*. Zürich: VDF Hochschulverlag.
- Hale, C. (1987). *Analysis of the engineering design process in an industrial context*. Hampshire: Dissertation, University of Cambridge, Grants Hill Publication.
- Hansen, F. (1968). *Konstruktionssystematik*. TEB Verlag Berlin.
- Hauser, S. (2007). *Konzepte zur Validierung geometrischer Charakteristika von Mikroverzahnungen* (Bde. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung Nr. 27). Karlsruhe: Universitätsverlag.
- Hinds, P., & Weisband, S. (2003). *Knowledge Sharing and Shared Understanding* (Bde. in Gibson, C, Cohen , S, Virtual Teams That Work Creating Conditions for Virtual Team Effectiveness). San Francisco: John Wiley & Sons, Jossey-Bass.
- Hoaglin, D., Mosteller, F., & Tukey, J. (1983). *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. New York (et al.);: John Wiley & Sons, Inc.
- Hoover, S., Rinderle, J., & Finger, S. (1991). Models and abstractions in design. *Design Studies*, 12(4, S. 237-245).
- Hubka, V., & Eder, W. E. (1992). *Einführung in die Konstruktionswissenschaft, Übersicht, Modell, Anleitung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Hutcheson, R., McAdams, D. A., R.B., S., & I.Y., T. (2007). Function Based Systems Engineering. *Proceedings of International Conference on Engineering Design*.
- Hutterer, P. (2005). *Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die Produktentwicklung*, Dissertation. München: Technische Universität München.
- Jänsch, J. (2007). *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz*:

- Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Jänsch, J., & Birkhofer, H. (2007). Imparting design methods with the strategies of experts. *Proceedings of INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED'07*. Paris.
- Jensen, T., & Andreasen, M. (2010). "Design methods in practice – beyond the 'systematic approach' of Pahl/Beitz". *Procs.of the Designconference Design2010*. Dubrovnik, Croatia.
- Jorden, W. (1983). Die Diskrepanz zwischen Konstruktionspraxis und Konstruktionsmethodik. *Proceedings of the international Conference of Engineering Design*. Kopenhagen.
- Karrar, C. (2008). *Ein Beitrag zur Entwicklung, Dimensionierung und Prüfung trockenlaufender Kupplungen und Bremsen in Antriebsstrangsystemen im Hinblick auf die Vermeidung von Reibschwingungen* (Bde. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung Nr. 35).
- Keller, R., Alink, T., Pfeifer, C., Eckert, C. M., Albers, A., & Clarkson, J. P. (2007). Using Product Models to predict change propagation: a comparison of two approaches. *Proceeding of 16th International Conference on Engineering Design ICED 07*. Paris.
- Koller, R. (1994). *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. Berlin: Springer Verlag.
- Lind, M. (1994). Modeling Goals and Functions of Complex Plants. *Applied Artificial Intelligence*, 8, pp. 259-283.
- Logie, R. (1995). *Visuo-spatial Working Memory*. Hove M: Psychology Press.
- Lossack, R. S. (2004). *Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion*. Karlsruhe: Habilitationsschrift, Universität Karlsruhe (TH).
- Marples, D. L. (e-m 8 1961). The decisions of engineering design. *IRE Transactions on engineering management*.
- Marques, P., Alink, T., Albers, A., J Requeijo, J., Saraiva, P., .., et al. (2009). Integration of the Contact and Channel Model with Axiomatic Design. *Proceedings of the International Design Conference on Axiomatic Design*. Lissabon.
- Matthiesen, S. (Nr. 6 2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer System. *IPEK Forschungsberichte* .
- Meboldt, M. (Nr. 28 2008). Ganzheitliche Modellbildung der Produkthenstehung - von mentalen Modellen bis zum Workflow für den Umgang mit Komplexität - als Beitrag zum integrierten Produkthenstehungs- Modell (IPeM). *IPEK Forschungsbericht*.
- Miller, G. A. (Vol. 63 1956). Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information. *The Psychological Review*, S. 81-97.
- Mitariu-Faller, M. (2009). *Methoden und Prozesse zur Entwicklung von Friktionssystemen mit Ingenieurkeramik am Beispiel einer trockenlaufenden Fahrzeugkupplung* (Bde. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung Nr. 38). Karlsruher Institut für Technologie.
- Müller, J. (1990). *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Oerding, J. (2009). *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produkthenstehung - Strukturierung von*

Zielsystemem mit C&C-M. Karlsruhe.

- Ohmer, M. (2008). *Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM* (Bd. Band 32). Karlsruhe: IPEK Forschungsberichte.
- Ottnad, J. (2009). *Topologieoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systemen* (Bde. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung Nr. 40). Karlsruher Institut für Technologie.
- Pahl, G. (1994). *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren; Ergebnisse des Ladenburger Diskurses vom Mai 1992 - Oktober 1993*. Köln: TÜV Rheinland.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2003 und 2005). *Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Redtenbacher, F. (1852). *Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaus*. Mannheim: Bassemann.
- Reinicke, T. (2004). *Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung: Eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration*. Berlin: Verlag Dr. Hut.
- Reuleaux, F. (1875). *Lehrbuch der Kinematik Bd. 1: Theoretische Kinematik. Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens*. Braunschweig: Vieweg.
- Rittel, H. W. (1980). Second generation design methods (interviews). *DMG 5th anniversary report 1972*. Chichester: Cross, N.: Development in design methodology.
- Rodenacker. (1970). *Methodisches Konstruieren, Konstruktionsbücher Band 27*. Berlin: Springer Verlag.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie - Eine Systemtheorie der Technik* (Bde. 3., überarbeitete Auflage). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Roth, K. H. (1994). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 1*. Berlin: Springer Verlag.
- Saak, M. (Nr. 23 2007). Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototypen für ein rechnergestütztes Werkzeug zum effizienten Einsatz der Problemlösungsmethodik "SPALTEN". *IPEK Forschungsbericht*.
- Schregenberger, J. W. (1980). *Methodenbewusstes Problemlösen: ein Beitrag zur Ausbildung von Ingenieuren, Beratern und Führungskräften*. Zürich: Dissertation, Techn. Hochschule Zürich.
- Schyr, C. (Nr. 22 2006). Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. *IPEK Forschungsberichte*.
- Simon, H. (1969). *Sciences of the Artificial*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Stacey, M. K., & Eckert, C. M. (2003). "Against Ambiguity". *Journal of Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*(12(2), 153-183).
- Stone, R., & Wood, K. (2000). Development of a Functional Basis for Design. *Journal of Mechanical Design*, 122, pp. 359-370.
- Stuffer, A. (Nr. 25 2007). Prototyp eines stufenlos verstellbaren Getriebes als Technologieträger für die Potenzialabschätzung von ingenieurkermaischen Werkstoffen in geschmierten Friktionssystemen. *IPEK Forschungsberichte*.
- Suh, N. P. (1990). *Principles of Design*. New York: Oxford Univ. Press.

- Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure. (1997). *VDI Richtlinie 2222 - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- VDI. (1993). *VDI Richtlinie 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.
- VDI, V. (1996). *VDI Richtlinie 2800: Wertanalyse*. VDI Verlag.
- VDI, V. (2004). *VDI Richtlinie 2223 - Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- VDI, -V. D. (1996b). *VDI Richtlinie 2803: Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode*.
- Vermaas, P. (2009). Flexible meaning of function in engineering. *Proceedings of ICED*. Stanford.
- Vermaas, P. (2010). TECHNICAL FUNCTIONS: TOWARDS ACCEPTING DIFFERENT ENGINEERING. *Proceedings of the TMCE*. Ancona.
- Visser, W. (1996). *Cognitive artifacts of designing*. Lorence Erlbaum Associates.
- Warell, A. (1999). Introducing a use perspective in product design theory and methodology. In *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC99/DTM8782*. . Las Vegas, NV.
- Weber, C. (2008). How to Derive Application-specific Design Methodologies. *Proceedings of the Design 2008, vol. 1* (S. pp. 69–80). Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.
- Wienold, H. (1995). Theoretische Konstrukte. . In W. u.a., *Lexikon zur Soziologie*.
- Zeitz, C. (1997). Some Concrete Advantages of Abstraction: How Experts' Representations Facilitate Reasoning. *Human and Machine, P. J. Feltovich et al.*(43-65).
- Züst, R. (1998). *Systems Engineering*. Zürich: Verlag Eco-Performance.

11Begriffe

Begriff	Erklärung
Validierung	Funktionsnachweis durch Test oder Simulation und Abgleich und Anpassung des Zielsystems
Denkmodell	Denkmodelle sind Weltbilder, die eine modellhaft vereinfachte Beschreibung der Welt aufgrund einer umfassenden gedanklichen Auseinandersetzung liefern. Denkmodelle sind höchst individuell und sind gedankliche Hilfskonstruktionen.
System/ Teilsystem	Ein System hat immer eine Funktion, deshalb gehört die Beschreibung der Funktion genauso zum System, wie die Gestalt des die Funktion erfüllenden Bauteile/Baugruppen.
Notation	Ist die Benennung von Gegenständen durch das Fixieren (qualitative und quantitative Repräsentation) von Dingen und Bewegungsverläufen in schriftlicher Form mit vereinbarten symbolischen Zeichen.
Hypothese	Ist eine Aussage, der Gültigkeit unterstellt wird, die aber nicht bewiesen oder verifiziert ist. Für Hypothesen ist es üblich, dass die Bedingungen angegeben werden, unter denen sie gültig sein sollen.
Auffassung von Funktion	Das was Anwender sich unter Funktionen vorstellen, unabhängig von Bedeutung, Darstellung oder Formulierung
Definition	Beschreibung der Auffassung der Funktion in wenigen Sätzen
Technische Funktion	Bisher im C&C-Ansatz verwendet: Steht für die Funktion eines technischen Systems.
Teleologie	Ist die Lehre, dass Handlungen oder überhaupt Entwicklungsprozesse an Zwecken orientiert sind und durchgängig zweckmäßig ablaufen. Der Ausdruck wurde eingeführt vom deutschen Philosophen Christian Wolff in seiner Philosophia rationalis, sive logica (1728).
Gestalt	Die Gemeinschaft von Form und Stoffeigenschaft eines Körpers, unabhängig davon, ob der Körper substanzuell oder nur gedanklich existiert. Die Form beinhaltet hierbei alle geometrischen Körpereigenschaften aber auch die Beschreibung von Quellcode.
Gestalten =	Die Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen die Gestalt von

Gestaltungsprobleme Lösen	Produkten bestimmt wird, d. h. mit denen die Anordnung von Elementen, geometrischen Formen, Oberflächen, ggf. Farben und Abmessungen sowie Materialien festgelegt werden und zu einem Ganzen zusammengefügt werden. Bei nicht stofflichen Produkten, z. B. Software Programmen wird Gestalten auch zur Beschreibung programmtechnischer Lösungen verwendet. (VDI, 1993), S. 40
Wirkung	Beschreibt das Ereignis, das auftritt, wenn ein System auf ein anderes wirkt. Die Wirkung ist das Ereignis, das im benachbarten System auftritt, ohne jedoch dessen Reaktion auf andere benachbarte Systeme zu betrachten. Wirkung ist die Nutzung eines physikalischen/chemischen Effektes in einem technischen System. Die Wirkung beschreibt das Resultat eines Effektes im Sinne des Zwecks.
Effekt	Ein Effekt beschreibt, was in einem WFP oder einer LSS vorgeht. Der Effekt beschreibt das Verhalten einer einzelnen Stelle. Missverständlich ist, dass mit <i>effect</i> englischsprachig Wirkung und Effekt beschrieben werden.
Gestaltungsproblem	Eine Aufgabenstellung, deren Ergebnis ein technisches System ist. Dieses technische System ist ein mechatronisches System. Das Gestaltungsproblem bezieht sich nicht nur auf das Gesamtsystem, sondern im Besonderen auch auf Teilsysteme, die durch neue Teilsysteme ersetzt oder optimiert werden. Siehe auch Abschnitt 2.2
Diskretisierung	Diskretisierung ist ein zentrales Konzept in der numerischen Mathematik, wo damit die Zerlegung räumlicher Kontinua wie Oberflächen etc. in kleine Abschnitte bzw. einzelne Punkte bezeichnet wird
Fraktal	Ein Begriff, der natürliche oder künstliche Gebilde oder geometrische Muster bezeichnet, die einen hohen Grad von Skaleninvarianz bzw. Selbstähnlichkeit aufweisen. Das ist beispielsweise der Fall, wenn ein Objekt aus mehreren verkleinerten Kopien seiner selbst besteht. Geometrische Objekte dieser Art unterscheiden sich in wesentlichen Aspekten von gewöhnlichen glatten Figuren.

12 Lebenslauf

Persönliche Daten	
Name:	Thomas Alink
Geburtsdatum:	24. April 1979
Geburtsort:	Freiburg
Staatsangehörigkeit:	Deutsch
Familienstand:	Ledig, zwei Kinder
Bildungsgang	
10/2000 – 03/2001	Maschinenbaustudium an der Fachhochschule Mannheim
04/2001 – 10/2005	Maschinenbaustudium an der Universität Karlsruhe (TH) Abschluss als Diplom Ingenieur
10/2002 – 10/2005	Produktentwicklung und Konstruktion
04/2005 – 10/2005	Diplomarbeit in Kooperation mit dem Engineering Design Centre der Cambridge University (UK)
Berufstätigkeit	
01/2006 – 12/2010	Akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Anhang

Vergleichsmodell der Pumpe

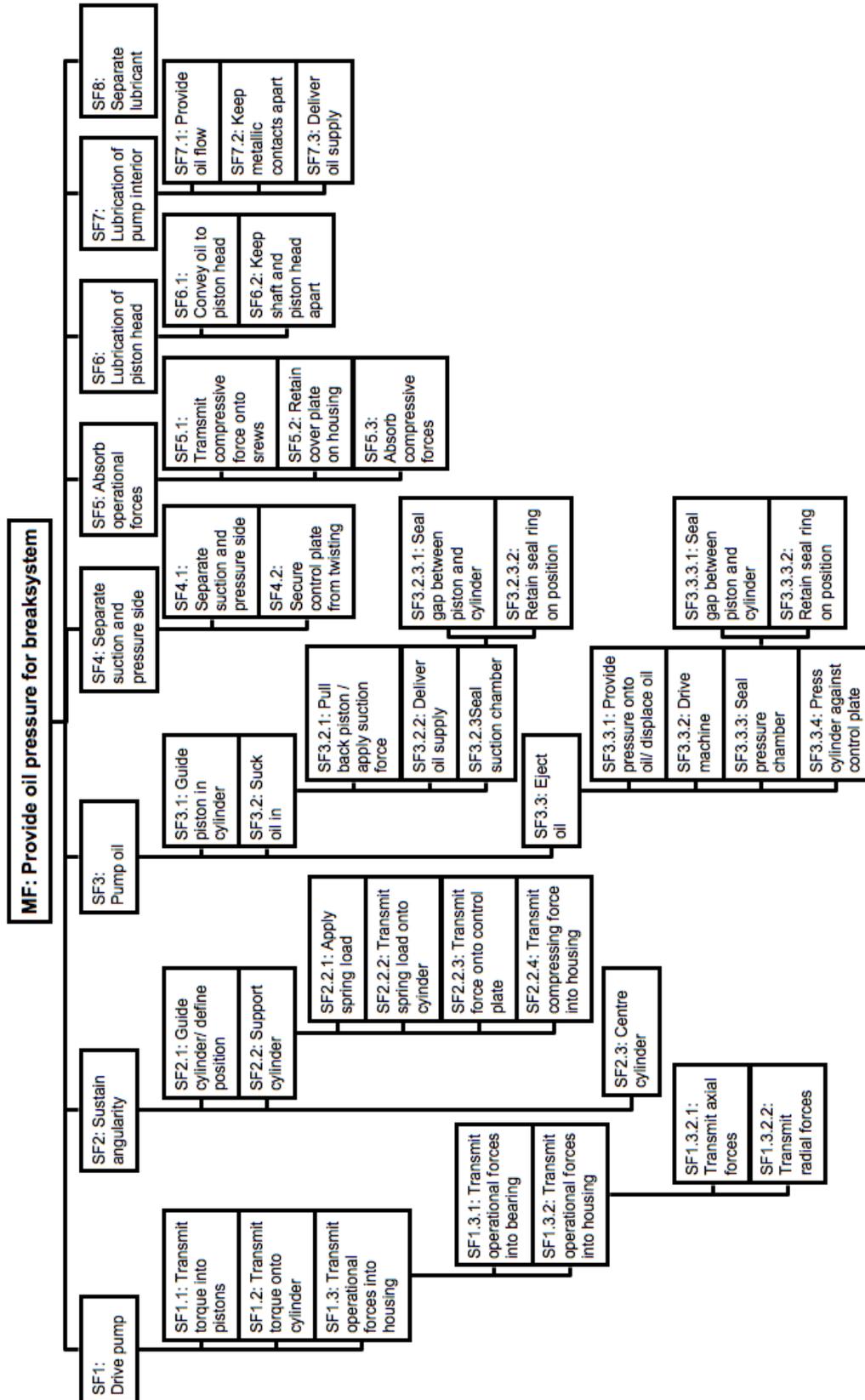


Figure 1: Overall Function tree

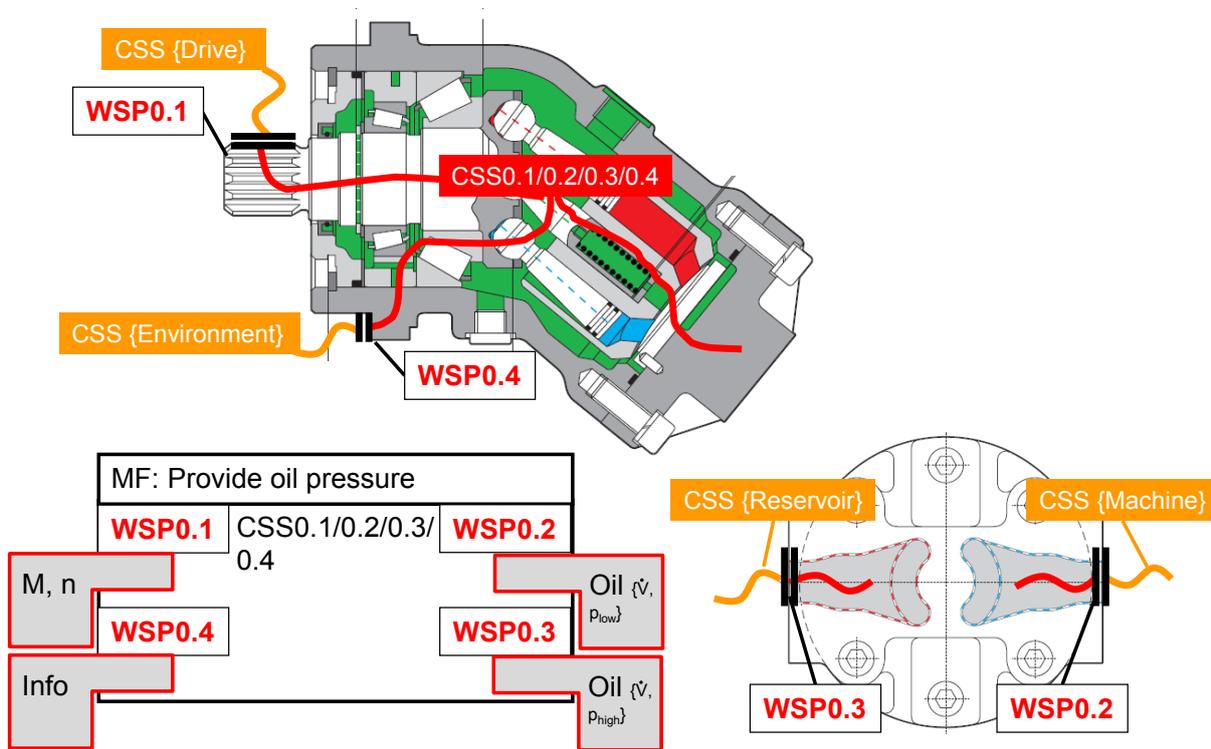


Figure 2: Main Function

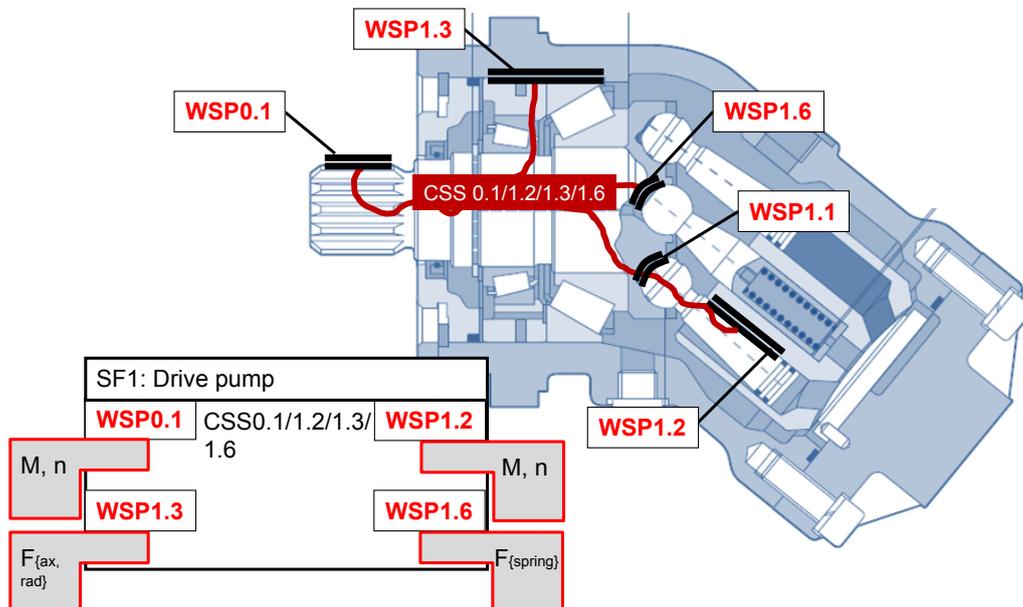


Figure 3: Sub function 1

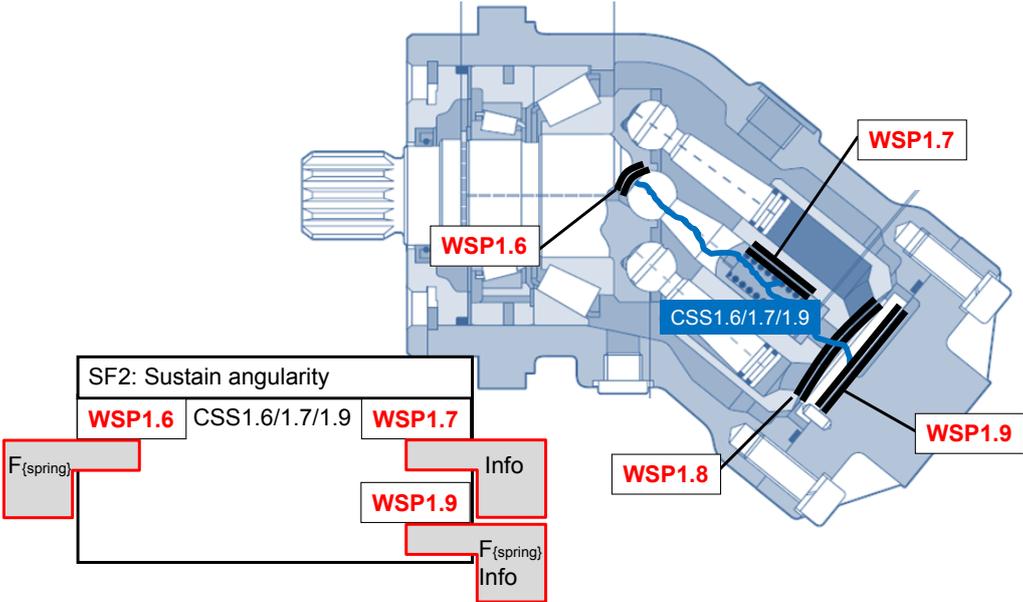


Figure 4: Sub function 2

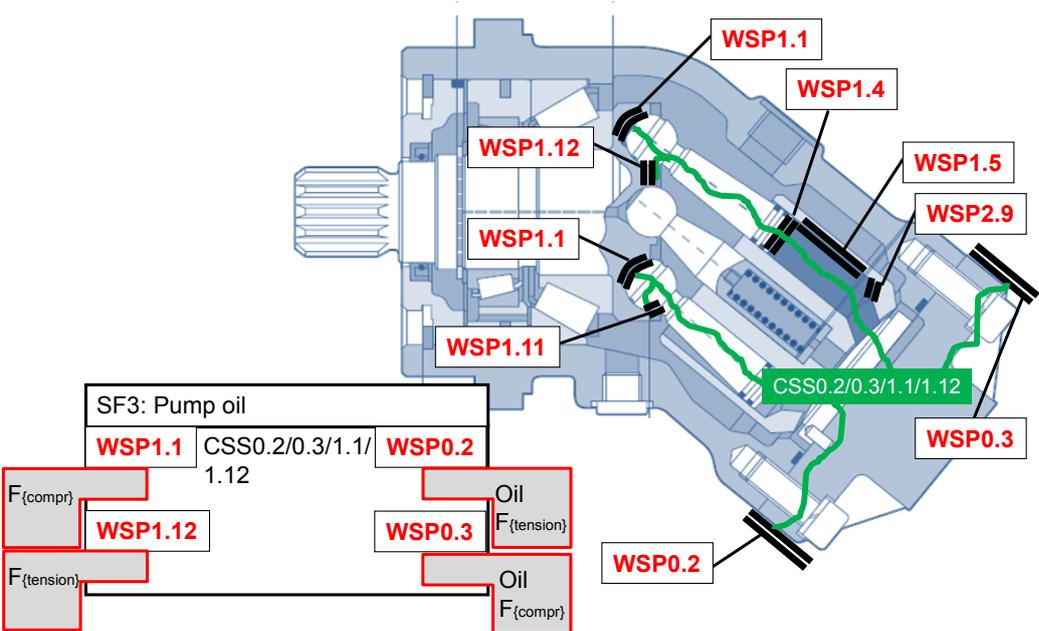


Figure 5: Sub function 3

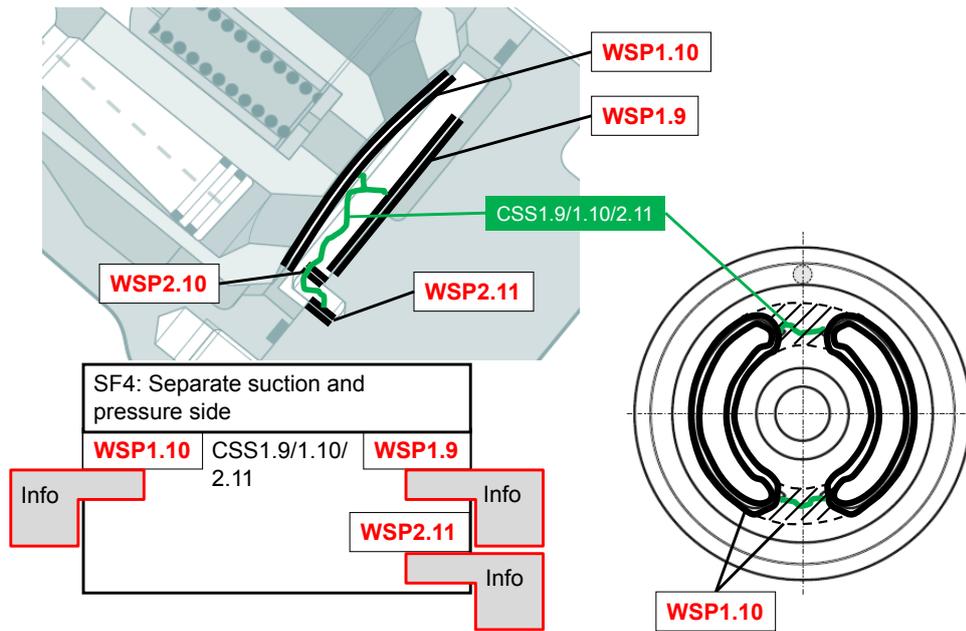


Figure 6: Sub function 4

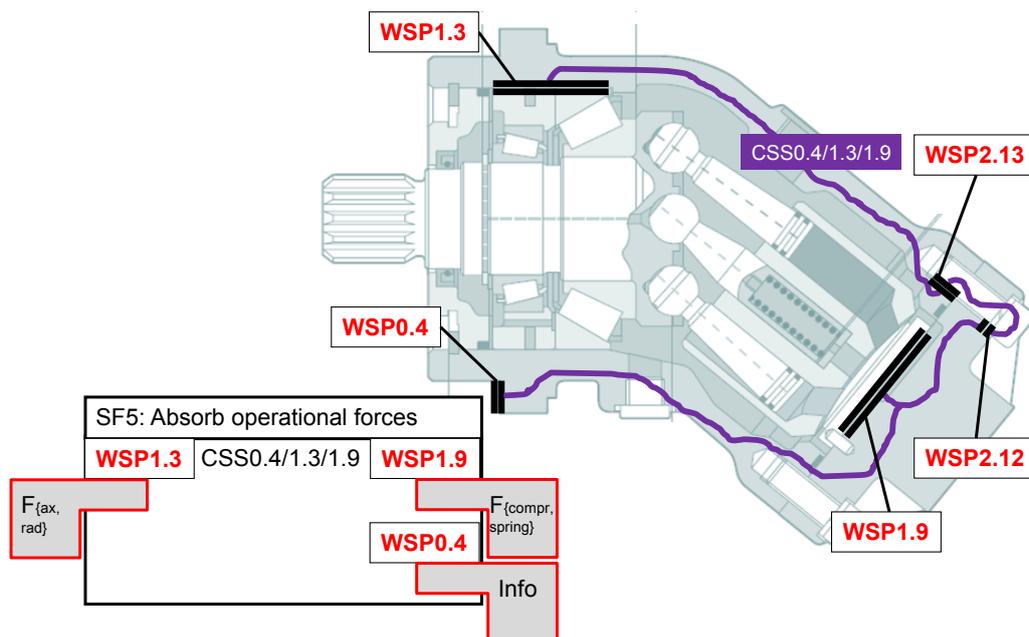


Figure 7: Sub function 5

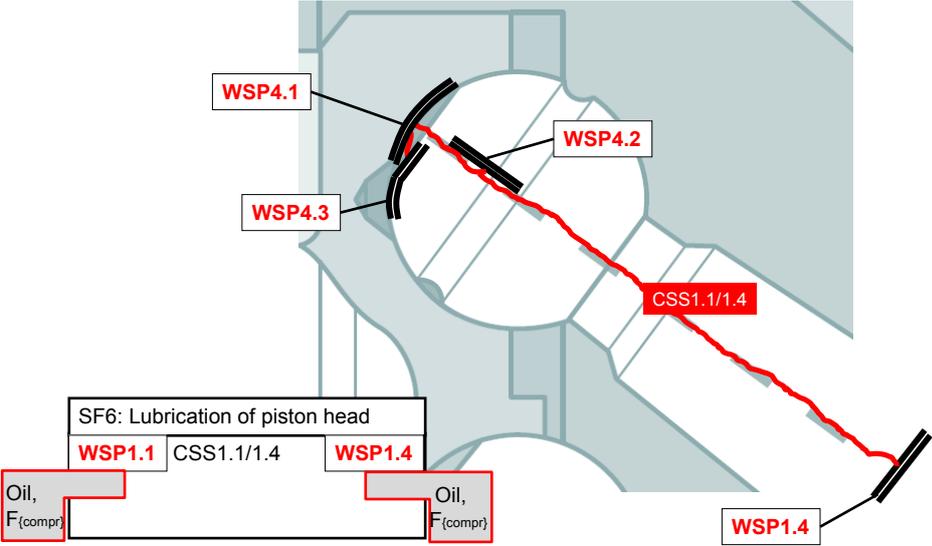


Figure 8: Sub function 6

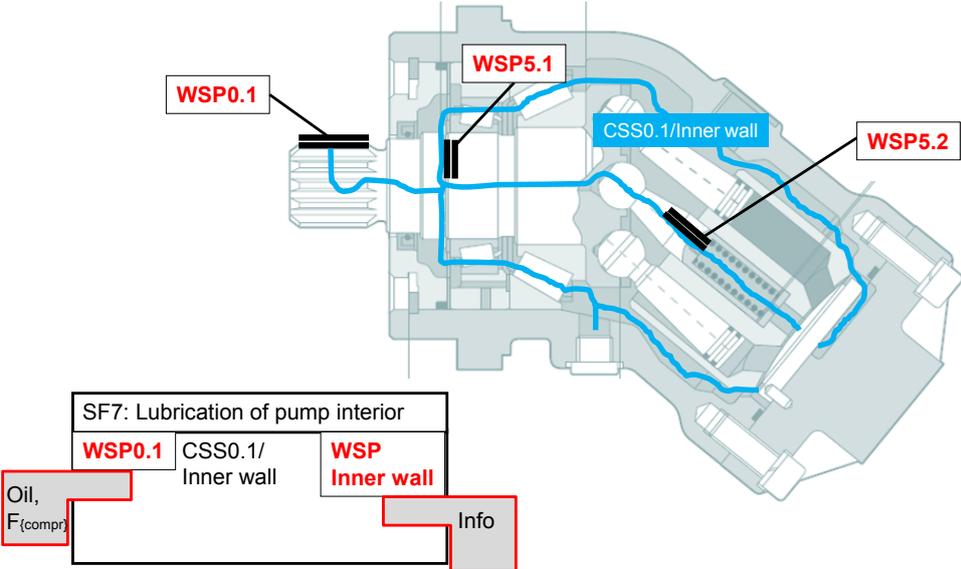


Figure 9: Sub function 7

State 1
 (during suction)

CSS1.2/2.4: Transmit torque onto cylinder

CSS1.4/1.11: Generate low pressure

CSS1.4/0.2: Deliver oil supply

State 2
 (upper turning point)

CSS1.2/2.4: Transmit torque onto cylinder

State 3
 (during ejection)

CSS1.2/1.4: Transmit torque onto cylinder

CSS1.4/2.3: Generate high pressure

CSS0.3/1.2: Drive machine

State 4
 (lower turning point)

CSS1.2/2.4: Transmit torque onto cylinder

Sequence A

Sequence B

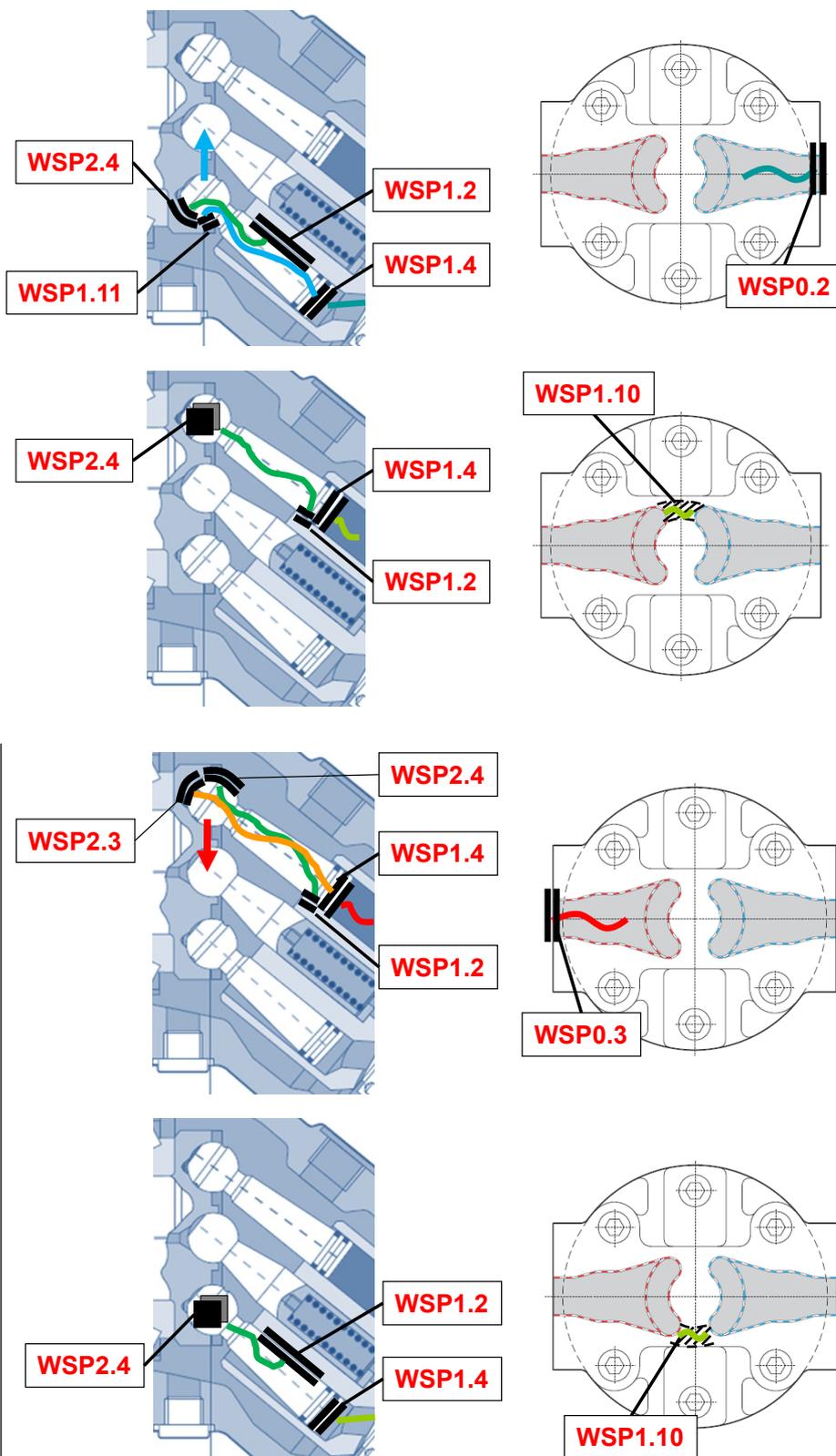


Figure 10: Sequence model for sequence A and B

