

Sebastian Leonid Thau

**Heuristiken zur Analyse und Synthese
technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz
auf Basis von Entwicklungsprojekten im
industriellen Umfeld**

Heuristics to analyze and design technical systems
with the C&C²-approach, developed within an
industrial surrounding

Band 66

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Forschungsberichte

Sebastian Leonid Thau

**Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme
mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten
im industriellen Umfeld**

Heuristics to analyze and design technical systems with the
C&C²-approach, developed within an industrial surrounding

Band 66

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

Copyright: IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Universität des Landes Baden-Württemberg und

nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Sebastian Leonid Thau

aus München

Tag der mündlichen Prüfung: 25.06.2013

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent: Prof. Dr. Mirko Meboldt

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 Krafffahrzeugbau) 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 66

Bei der Konstruktion von Produkten handelt es sich um einen stetigen Wechsel zwischen Analyse- und Synthese-Vorgängen. Analysiert werden beispielsweise die Kundenpotenziale, die Kundenwünsche, die Randbedingungen und auch die Unternehmenspotenziale, um so das inertielle Zielsystem eines Produktes erstellen zu können, während im weiteren Fortschritt der Entwicklung des Produktes natürlich die Analyse des technischen Wirkzusammenhanges, der Gestaltfindung usw. erfolgen muss. Mit diesen Analyseprozessen wechseln sich stetige Synthesevorgänge ab, wo aus den erzeugten Informationen kreativ Lösungskonzepte ausgearbeitet und mit steigendem Reifegrad für Funktion und Gestalt realisiert werden. Dieser sehr komplexe Prozess ergibt für den Menschen höchste intellektuelle Anforderungen, da der permanente Wechsel von ihm intuitiv, aber auch methodisch gestützt gesteuert werden muss. Bei der Konstruktion von Produkten ist natürlich die Zielrichtung eine kundenadäquate Lösung mit geringstmöglichem Aufwand an Zeit und Kosten zu erstellen. Hierzu wurden in Forschungsarbeiten unterschiedlichste unterstützende Methoden und Entwicklungsprozessmodelle erarbeitet. Beispiele sind hier Kreativitätsmethoden, aber auch Ansätze wie das Target Costing oder das Axiomatic Design. Viele dieser Ansätze und Methoden sind in der Praxis allerdings bisher nicht angekommen. Eine Ursache ist aus meiner Sicht, dass immer wieder versucht wird, den Zusammenhang von Funktion und Gestalt zu trennen. Dies führt dazu, dass in der praktischen Realisierung, bei der der synthetisierende Mensch natürlich vorwiegend in gestalteten Strukturen denkt und sie doch mit der Funktion koppelt, die klassischen Methoden nicht adäquat angewendet werden können und damit auch nicht genutzt werden. Ein Ansatz, der dieses überwinden soll, ist der sog. Contact und Channel-Ansatz (C&C²-Ansatz). Dieser wird von Albers und seiner Forschungsgruppe seit vielen Jahren systematisch entwickelt und wurde mittlerweile bereits auch in vielfältiger Weise in der Praxis angewandt. Trotzdem gibt es auch bei diesem Ansatz, der konsequent Funktion und Gestalt in einem integrierten Ansatz gemeinsam denkt, Hindernisse bei der Umsetzung durch Praktiker. Hierbei sind Fragestellungen der Abstraktion, aber auch der Fokussierung und der konsequenten Nutzung oftmals die Ursache für Anwendungshindernisse. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Sebastian Thau an. Er hat in einer praktischen Produktentwicklungsumgebung in realen Projekten die Anwendung des C&C²-Ansatzes zur Analyse technischer Systeme systematisch untersucht und daraus Heuristiken für die Nutzung der Methode in der praktischen Konstruktion abgeleitet. So gelingt es konkretes Anwendungswissen für

den C&C²-Ansatz bei der Analyse und in Teilen auch der Synthese technischer Systeme zu entwickeln und dies in konzentrierter Form – in Form von Heuristiken – zu beschreiben. Dabei nutzt er die Mittel der empirischen Forschung im industriellen Umfeld, so dass die erarbeiteten Heuristiken direkt auch aus der realen und praktischen Produktkonstruktion abgeleitet werden können. Diese Heuristiken sollen letztendlich auch die heuristische Kompetenz zum C&C²-Ansatz der Anwender verbessern, indem sie entsprechende Lehrkonzepte beinhalten. Herr Dr.-Ing. Sebastian Thau leistet mit seiner Arbeit einen wichtigen Beitrag zu weiterer Verbreitung und Nutzbarmachung des C&C²-Ansatz in der realen Konstruktionspraxis.

Albert Albers

Kurzfassung

Unter Innovation wird oft ein möglichst neuartiger Lösungsansatz auf der Basis ausgeprägter Kreativität verstanden. Die Innovation wird jedoch nicht nur am Neuheitsgrad des Produktes für das Unternehmen und die Kunden beurteilt, sondern vor allem am wirtschaftlichen Erfolg. Daher besteht die Herausforderung in der Produktentwicklung nicht in der Neukonstruktion, sondern in der Produktgenerationenentwicklung, die auf bestehende Produkte aufbaut. Hierbei ist die Analyse des bestehenden technischen Systems die Grundlage, um genügend Systemverständnis für die Entwicklung neuer technischer Systeme aufzubauen.

Für den Entwickler sind Modelle beim Systemverständnisaufbau ein wichtiges Hilfsmittel. Der C&C²-Ansatz eignet sich sehr gut, um Modelle technischer Systeme zu erstellen. Durch die Verknüpfung der abstrakten Funktion mit der konkreten Gestalt über die Elemente WFP und LSS, kann in C&C²-Modellen Systemverständnis dargestellt werden. Eine Hürde bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes ist, dass den Anwendern wenige Hilfestellungen zur Verfügung stehen, wie C&C²-Modelle eines technischen Systems aufgebaut werden können.

Das Ziel dieser Dissertation besteht darin, die Anwendung des C&C²-Ansatzes zu untersuchen und daraus Hilfestellungen zu erarbeiten. Dafür wird der C&C²-Ansatz bei der Problemlösung und Entwicklung technischer Systeme im industriellen Umfeld angewendet. Aus den erfolgreichen Vorgehensweisen werden C&C²-Heuristiken abgeleitet. Die Heuristiken sind das Ergebnis dieser Arbeit und beschreiben, wie und wann der C&C²-Ansatz angewendet werden kann, um ein technisches System zu analysieren und das gewonnene Systemverständnis in C&C²-Modellen darzustellen. Die C&C²-Heuristiken zeigen, dass das Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz nicht bedeutet, die bekannten und bewährten Vorgehensweisen zu verwerfen, sondern sie mit den C&C²-Heuristiken zu kombinieren.

Die Validierung der Ergebnisse findet ebenfalls im industriellen Umfeld statt. Es wird aufgezeigt, dass die C&C²-Heuristiken einen wichtigen Beitrag dazu leisten können, C&C²-Anwendungswissen zu vermitteln und die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes zu verbessern. Dadurch erhöhen die C&C²-Heuristiken den Mehrwert, den der C&C²-Ansatz in der Produktentwicklung bietet.

Abstract

An Innovation is often understood as a revolutionary new design, based on ground breaking creativity. However innovation is not just assessed by its novelty for the company and the customer, but especially by its economic success. Thus the challenge in product development is not to create a complete new design, but to base the design on existing technical systems/platforms. In this context the analysis and understanding of the existing technical system provides the basis for development of the new technical system.

Models are a very important tool for designers to gain system understanding. The C&C²-approach is very well suited to building models of technical systems. By Using the elements “Working Surface Pairs” (WSP) and “Channel and Support Structures” (CSS) it is possible to link abstract functions with concrete geometry and therefor describe system understanding within a C&C²-model. A barrier in using the C&C²-approach is the lack of support guidelines for building C&C²-models.

The intention of this thesis is to research the application of the C&C²-approach and to develop support guidelines based on this research. In order to do this the C&C²-approach was applied for problem solving in the product development processes within an industrial surrounding. From the successful applications C&C²-heuristics could be derived and are presented within this thesis. They describe when and how the C&C²-approach can be applied in order to analyze a technical system and to describe the gained system understanding in the C&C²-model. The C&C²-heuristics showed that working with the C&C²-approach does not require the user to discard established methods of product development, but instead they can be combined with the C&C²-heuristics.

The validation of the results was also performed in an industrial environment. It showed that C&C²-heuristics provide an instruction for use for the C&C²-approach and thus increasing the benefit of using it whilst problem solving and in the development processes. Overall this enhances the added value of the C&C²approach for product development.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am IPEK - Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und als Mitarbeiter der Hilti Aktien Gesellschaft in Schaan, Liechtenstein. Im Folgendem möchte den Personen danken, die diese spannende Kooperation ermöglicht haben. Dank ihrer Hilfe konnte ich in meiner Dissertation Wissenschaft und Praxis sehr gut verbinden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, der mich und mein Promotionsthema, während meiner Zeit als Doktorand am IPEK, in einzigartiger Weise förderte. Er hatte stets Vertrauen in den Erfolg meiner Arbeit und gab mir den Freiraum, meine Forschungsinhalte in dieser besonderen Kooperation umzusetzen. Prof. Albers hat in vielen, sehr spannenden und zielführenden Diskussionen meine Arbeit vorangebracht.

Für die Übernahme des Korreferates und die vielen fruchtbaren Diskussionen zu meinem Forschungsthema bin ich Prof. Dr. Mirko Meboldt, vom Institut für Design, Materialien und Fabrikationen an der ETH Zürich, sehr dankbar.

Mein spezieller Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen. Er hatte einen großen Einfluss auf die vorliegende Forschungsarbeit. Sein strategischer Weitblick und seine enorme Stärke, Dinge voranzutreiben, haben maßgeblich dazu beigetragen, dass diese Arbeit in Kooperation zwischen dem IPEK und Hilti stattfinden konnte. Seine Ambitionen Wissenschaft und Praxis zu verbinden, haben mich stark geprägt und somit zu meiner beruflichen und persönlichen Entwicklung beigetragen.

Eine wertvolle Bereicherung meiner wissenschaftlichen Arbeit bildeten die intensiven Gespräche mit Claudia Eckert, PhD, Senior Lecturer an der Open University (UK) und Dr.-Ing. Josef Ponn, Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH. Des Weiteren möchte ich meinen Kollegen am IPEK und bei Hilti danken. Aus der Zusammenarbeit habe ich viele wichtige Anregungen für meine Untersuchungen bekommen. Insbesondere möchte ich hier Thomas Alink, Quentin Lohmeyer, Eike Sadowski und Anne Ruckpaul danken. Bei Hilti gilt mein besonderer Dank Andreas Walter, Thomas Hannen und den Praktikanten sowie Diplomanden, die ich betreut habe.

Eine solche Arbeit ist ohne die Unterstützung im privaten Umfeld nicht möglich. Dafür möchte ich meinen Freunden, sowie meiner Familie, Klaus Thau, Gertraud Thau, Melanie Hümmer und meiner Freundin, Elisabeth Malm, danken.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation der Arbeit.....	5
1.2	Aufbau der Arbeit	7
2	Stand der Forschung	10
2.1	Anforderungen in der Produktentwicklung	11
2.2	Modelle als geeignetes Hilfsmittel im Entwicklungsprozess	14
2.2.1	Informationsgehalt der Modelle.....	15
2.2.2	Abbildung der Eigenschaften des technischen Systems im Modell	18
2.3	C&C ² -Ansatz und C&C ² -Modell	21
2.3.1	Technische Systeme	28
2.3.2	C&C ² -Basisdefinition: Definitionen und Grundhypothesen	29
2.3.3	Anwendungswissen zum C&C ² -Ansatz.....	34
2.3.4	C&C ² -Modelle technischer Systeme	42
2.3.5	Fazit zum Forschungsstand bezüglich des C&C ² -Ansatzes.....	45
2.4	Heuristiken in der Produktentwicklung.....	46
3	Zielsetzung der Arbeit.....	55
4	Forschungsmethode der Arbeit.....	59
4.1	Methode zur Datenerhebung.....	59
4.2	Forschungsmethode.....	61
4.3	Beispielsysteme für die Definition der Heuristiken	66
5	Heuristiken für den C&C ² -Modellaufbau (HMA)	71
5.1	Systemgrenze der Gestalt [SGG]	72
5.2	Systemgrenze der Zeit: Zustand und Sequenz [SGZ].....	80
5.3	Ort der Funktionserfüllung [ODF].....	90
5.4	Kammstruktur [KS]	93

5.5	Bestandteile eines C&C ² -Modells	97
5.6	Fazit zu den HMA	102
6	Heuristiken für die C&C ² -Modellbildung (HMB)	103
6.1	Orientierung bei der Modellbildung	103
6.1.1	Identifizierung bzw. Bestimmung von WFP	104
6.1.2	Identifizierung bzw. Bestimmung von LSS	105
6.1.3	Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen	106
6.1.4	Anmerkung	106
6.2	Identifizierung bzw. Bestimmung von WFP	107
6.2.1	Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil	108
6.2.2	Oberflächenanalysen von Bauteilen	110
6.2.3	Bildgebende Verfahren	114
6.2.4	CAD Zeichnungen und Skizzen	116
6.2.5	Simulationen	118
6.2.6	Schnittmodelle durch WFP	118
6.2.7	Vergrößernde oder verkleinernde Prototypen	120
6.3	Identifizierung bzw. Bestimmung von LSS	121
6.3.1	Versagensstellen	121
6.3.2	Simulationen	123
6.3.3	Kraft- und Spannungs- induzierende Materialien	124
6.4	Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen	125
6.4.1	Zeitlich veränderte Betrachtungen der Systemoperationen	126
6.4.2	Anhalten der Systemoperationen	127
6.4.3	Nachstellen einzelner Funktionen	128
6.4.4	Eliminierung aller irrelevanten WFP bzw. LSS	130
6.4.5	Eliminierung des relevanten WFP bzw. LSS	131
6.4.6	Veränderung der Eigenschaften der WFP bzw. LSS	132

6.5	Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften.....	133
6.5.1	Verknüpfung durch mathematische Methoden.....	137
6.5.2	Verknüpfung durch Variation der WFP Anzahl.....	141
6.5.3	Verknüpfung mit vereinfachter Gestalt des Systems.....	142
6.5.4	Verknüpfung durch Simulationsmethoden	143
6.6	Fazit zu den HMB.....	144
7	Validierung der Heuristiken im industriellen Umfeld	145
7.1	Industrielle Entwicklungsprojekte mit dem C&C ² -Ansatz.....	147
7.2	Untersuchungen der Anwendung des C&C ² -Ansatz in projektbegleitenden Arbeiten.....	151
7.3	Schulung zur Anwendung des C&C ² -Ansatzes.....	155
7.4	Interviews zur Anwendung des C&C ² -Ansatzes.....	160
7.5	Workshops zum C&C ² -Ansatz	163
7.6	Fazit zur Validierung.....	168
8	Zusammenfassung und Ausblick	169
8.1	Anwendung der Heuristiken.....	170
8.2	Persönliche Anmerkung	171
8.3	Offene Themen und Ausblick	171
9	Anhang.....	173
9.1	Übersicht zu allen Heuristiken	173
9.2	Fragebogen und Auswertung der C&C ² -Schulung.....	174
9.3	Abbildungsverzeichnis.....	176
10	Literaturverzeichnis	182

1. Einleitung

„Innovation“ ist ein allgegenwärtiger Begriff, wenn es um den Erfolg von Unternehmen und Ländern in der globalen Marktwirtschaft geht. Es wird behauptet, dass nur bestehen kann, wer innovativ ist.¹ Der Zusammenhang scheint ganz klar zu sein: je innovativer, desto wirtschaftlich erfolgreicher ist ein Unternehmen. DEIGENDESCH schreibt hierzu: „Der durchweg positiv wahrgenommene Bedeutungsinhalt führt zu einer fast inflationären Nutzung der Begriffe [Kreativität und Innovation].“²

Die Anforderungen des Marktes scheinen im Gegensatz zu dieser These zu stehen. In den letzten Jahrzehnten sind zunehmend kürzere Entwicklungszeiten für Produkte gefordert. Damit haben sich auch die Anforderungen an Produktinnovationen verändert.³ GREIF zeigt mit seiner Analyse der Patentanmeldungen in Deutschland, dass über die Hälfte der Erfindungen ein bestehendes technisches System verbessern. Bei einem Drittel der Erfindungen handelt es sich um „neue Produkte und Verfahren“, die auf ähnlichen, bereits existierenden technischen Systemen basieren. Nur 17% der Produkte sind „Basiserfindungen“, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass wesentliche Teile des Systems technisch neu sind (siehe Abbildung 1). COOPER⁴ zeigt auf, dass die Innovationsleistung der Unternehmen in den letzten Jahren gesunken und die „Ergänzung bestehender Produktlinien“ und die „Verbesserungen und Veränderungen bestehender Produkte“ zugenommen hat.

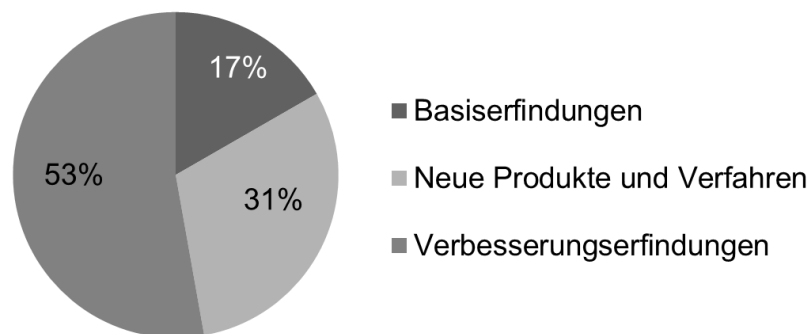


Abbildung 1: Sinkende Innovationsleistung in Unternehmen⁵

¹ Siehe z.B. <http://www.siemens.com/about/de/werte-vision-strategie/werte.htm>

² Deigendesch 2009: S. 1

³ Siehe <http://www.zeit.de/2012/31/Unternehmen-Nachahmung-Innovation>

⁴ Vgl. Cooper 2005 auf S. 23, basierend auf Studie von Adams/Boike 2004

⁵ Albers et al 2008d: S. 1248

COLLINS⁶ kommt bei der Untersuchung wirtschaftlich besonders erfolgreicher Unternehmen sogar zu dem Ergebnis, dass die Innovationskraft kein entscheidender Erfolgsfaktor ist.

In diesem Zusammenhang macht es Sinn, den Begriff „Innovation“ differenzierter zu betrachten. Das Wort Innovation leitet sich aus dem lateinischen Wort „novus“ für „neu“ ab und steht für „(Er-)Neuerung“.⁷ Der Begriff „Innovation“ wird unterschiedlich definiert und damit sehr breit verwendet. BERGER bezeichnet Innovation als „alle aus unternehmensindividueller Sicht erstmalige relevanten Neuheiten“⁸, wobei er hier zwischen „prozessbezogener“ und „objektbezogener“ Innovation unterscheidet. Letztere sind Produkte, die für das Unternehmen und/oder den Konsumenten innovativ sind.⁹ Ähnlich wie BERGER unterscheiden BERTH¹⁰ und DEBUS zwischen „Durchbruchinnovationen“ bzw. „Radikalinnovation“ und „Verbesserungsinnovationen“ bzw. „inkrementelle Innovation“: „Als radikale Innovationen werden solche bezeichnet, die auf einer neuen Technologie basieren. Inkrementelle Innovationen sind eher kontinuierliche Verbesserungen und Weiterentwicklungen einer bestehenden Technologie. Als Beispiel für eine inkrementelle Innovation kann man das Antiblockiersystem (ABS) ansehen, das das Auto als bestehende Technologie inkrementell verbesserte. Betrachtet man die Fülle der in den letzten Jahren in Autos eingebauten Innovationen, kann man von einem kontinuierlichen Strom inkrementeller Innovationen sprechen. Radikale Innovationen kommen dagegen eher diskontinuierlich vor.“¹¹

Der Unterschied liegt im Neuheitsgrad der Technologie und damit der Innovation für den Markt und das Unternehmen (siehe Abbildung 2). Mit zunehmendem Neuheitsgrad verändern sich die Anforderungen an das Unternehmen, da die Planbarkeit des Aufwandes an Zeit und Kosten zunehmend schwieriger wird.

⁶ Vgl. Greif 1998

⁷ Vgl. Duden auf S.372

⁸ Berger 1998: S. 26

⁹ Vgl. Berger 1998 auf S. 28

¹⁰ Vgl. Berth 1992 auf S. 182

¹¹ Debus 2002: S. 92

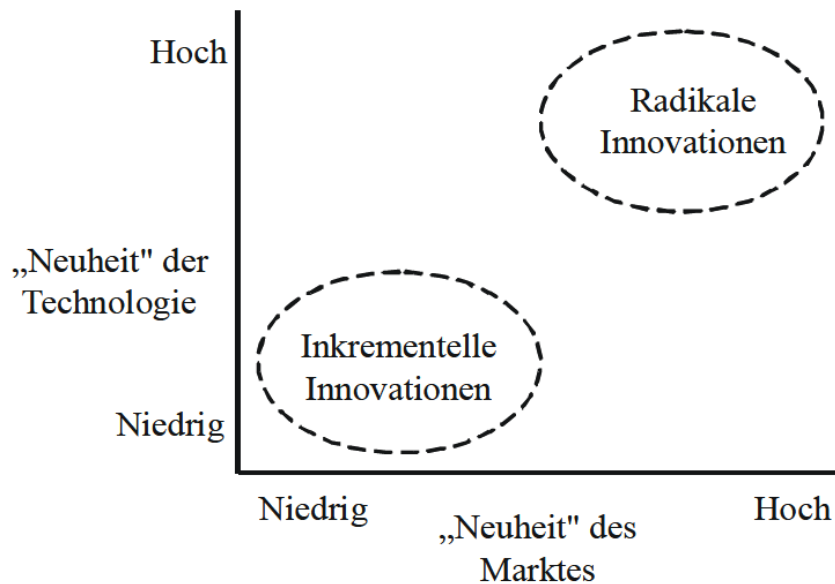


Abbildung 2: radikale und inkrementelle Innovation nach Debus¹²

Die Beurteilung des Neuheitsgrades von Produktinnovationen ist sehr schwierig, da kaum Messinstrumente oder allgemeingültige Merkmale existieren.¹³ Die Annahme, je radikaler eine Innovation, desto erfolgreicher ist das Produkt und damit das Unternehmen, kann nicht nachgewiesen werden.¹⁴ Das Gegenteil ist oft der Fall: Um den Marktanforderungen nach kürzeren Entwicklungszeiten und steigender Individualisierung und damit Zunahme der Variantenanzahl gerecht zu werden, basieren die „meisten Neuprodukte [...] auf vorhandenen Lösungen und verbessern oder ergänzen diese.“¹⁵ Der Anteil der Entwicklungsprojekte, bei denen es sich um eine Weiterentwicklung handelt, ist in den letzten Jahren gestiegen. Dies erklärt auch den prozentualen Anstieg der „Verbesserungen und Veränderungen bestehender Produkte“ in Abbildung 1. Das bedeutet, dass die Herausforderung in der Produktentwicklung in der „Produktgenerationenentwicklung“¹⁶ liegt.

Selbst bei radikalen Innovationen in einem Unternehmen starten die Entwicklungsmannschaften nicht bei „Null“.¹⁷ Entwickler haben vorher mindestens

¹² Debus 2002: S. 93

¹³ Vgl. Berger 1998 auf S. 27

¹⁴ Vgl. Specht et al 2002

¹⁵ Deigendesch 2009: S. 22

¹⁶ Begriff von Albers aus einer Diskussion 2011: Die Entwicklung von Produkten, die auf Vorgängerprodukten, bzw. ähnlichen technischen Systemen basieren

¹⁷ Vgl. Albers et al 2009 auf S. 1

schon Ideen oder Skizzen im Kopf, wobei sie durch bestehende technische Systeme, Wirkungen¹⁸ und Effekte¹⁹ beeinflusst sind. Auch FELDHUSEN ist der Überzeugung, dass „in der überwiegenden Zahl der Fälle ... eine Entwicklung oder Konstruktion nicht bei ‚Null‘ begonnen“²⁰ wird. Die Entwickler bedienen sich ihnen bekannter Wirkkonzepte²¹ und Gestaltungskonzepte.²²

Der wirtschaftliche Erfolg ist ein wichtiges Kriterium, wenn es um die Definition des Begriffes „Innovation“ geht. SCHUMPETER²³ unterscheidet zwischen „Invention“ und „Innovation“. Die reine Erfindung von etwas Neuem ist eine Invention. Innovation ist hingegen die erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung der Invention. Eine radikale Erfindung ist erst eine radikale Innovation, wenn sie sich auf dem Markt erfolgreich durchgesetzt hat.²⁴ Je radikaler die Invention, umso schwieriger ist es für Unternehmen zu beurteilen, ob aus der Invention eine Innovation wird. Oft zeigt sich dies erst nach der Einführung des Produktes.

Fazit. Mit Innovation wird oft ein möglichst neuartiger Lösungsansatz auf der Basis ausgeprägter Kreativität verstanden. Die Innovation wird jedoch nicht nur am Neuheitsgrad des Produktes für das Unternehmen und die Kunden beurteilt, sondern vor allem am wirtschaftlichen Erfolg.²⁵ Kreativität hat in der Produktentwicklung also nicht den Zweck möglichst radikale technische Neuerungen zu erschaffen, sondern wirtschaftlichen Erfolg durch gezielte Erneuerungen zu bringen. Auf dem vorherrschenden Käufermarkt muss das Produkt den Kundenanforderungen (im Sinne der geforderten Funktionen²⁶) entsprechen und in der Umsetzung so einfach wie

¹⁸ Siehe Kapitel 2.3.2: Wirkung ist die technische Nutzung eines physikalischen oder chemischen Effektes in der Gestalt des technischen Systems.

¹⁹ Siehe Kapitel 2.3.2: Ein Effekt kann physikalischer oder chemischer Natur sein und beschreibt einen generellen, gestaltungsfreien Vorgang, wie z.B. ein Reibungseffekt.

²⁰ Zitat von Feldhusen in einer Diskussion 2010 und vgl. Pahl/Beitz et al 2006 auf S. 94

²¹ Vgl. Feldhusen 2010: Ein Wirkkonzept „gibt die zur Funktionserfüllung gewählten physikalischen Effekte und deren Verknüpfung untereinander, die prinzipiellen Werkstoffarten (Effekträger) sowie die Gestaltung der Wirkflächen (WF) wieder.“

²² Vgl. Feldhusen 2010: Ein Gestaltungskonzept „legt die Hauptabmessungen und -gestaltung sowie die Zuordnung der Elemente eines Produkts untereinander unter Berücksichtigung des Hauptflusses und evtl. Nebenflüsse fest.“

²³ Vgl. Schumpeter 1961 auf S. 91

²⁴ Vgl. Schumpeter 1961 auf S. 100

²⁵ Vgl. Pahl/Beitz et al 2006 auf S. 94f: eine Innovation ist eine wirtschaftlich erfolgreiche Invention. Dabei spielt der Neuheitsgrad der Invention keine Rolle.

²⁶ Vgl. Alink 2010 auf S. 188f und Kapitel 2.3.2: Die Funktion ist eine Interaktion zwischen zwei benachbarten Systemen, wobei nicht die gegenständlichen Größen Energie und Information ausgetauscht werden.

möglich zu realisieren sein, um das Produkt zu einem attraktiven Preis-Leistungs-Verhältnis anbieten zu können: „Die beste Lösung ist die einfachste, die funktioniert“²⁷. Daher besteht die Herausforderung in der Produktentwicklung nicht in der Neukonstruktion, sondern im Lösen von Entwicklungsproblemen, die durch konkrete Randbedingungen bereits existierender Lösungen bestimmt werden.²⁸

1.1 Motivation der Arbeit

Die Motivation für diese Dissertation entstand während der Diplomarbeit des Autors. Aufgabe der Diplomarbeit war, mit dem C&C²-Ansatz²⁹ ein mechanisches System zu analysieren und das gewonnene Systemverständnis³⁰ für ein anschließendes Entwicklungsprojekt zu dokumentieren. Dabei sollte die Vorgehensweise bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes analysiert und der Nutzen des Ansatzes beurteilt werden. Das Fazit war, dass die Analyse des technischen Systems bzw. der Aufbau und die Darstellung des Systemverständnisses durch den C&C²-Ansatz entscheidend unterstützt wurden. Somit konnte eine wichtige Grundlage für die Synthese des technischen Systems erzeugt werden. Die Anwendung des C&C²-Ansatzes war aber mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, da speziell die Erstellung des C&C²-Modells³¹ gemäß der Grundhypothesen³² und Definitionen der C&C²-Elemente³³ als herausfordernd angesehen wurde. Des Weiteren musste der Autor viel Zeit investieren, um die C&C²-Elemente im technischen System zu identifizieren und zu

²⁷ Zitat von Albers in der Maschinenkonstruktionslehre- Vorlesung 2001

²⁸ Vgl. Eckert et al 2004

²⁹ Siehe Kapitel 2: Contact & Channel Ansatz - Der C&C²-Ansatz ermöglicht den Aufbau von Modellen technischer Systeme, mit dem Ziel den Anwender im Moment der Analyse und der Synthese in der Produktentwicklung zu unterstützen, indem abstrakte Funktionen mit konkreter Gestalt verknüpft werden. Durch diese Verknüpfung kann Systemverständnis aufgebaut, dargestellt und im Team diskutiert werden.

³⁰ Vgl. Alink 2010 auf S. 169: „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 Zweckorientierte und eine Verhaltensorientierte Perspektive.“

³¹ Siehe Kapitel 2.3: Ein C&C²-Modell ist ein Modell des technischen Systems, das mit dem C&C²-Ansatz aufgebaut wird

³² Siehe Kapitel 2.3: Hypothesen zur Abbildung des technischen Systems in einem C&C²-Modell

³³ Siehe Kapitel 2.3: Definitionen der Elemente des technischen Systems

verknüpfen. Hier wurde der Bedarf einer Hilfestellung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes festgestellt.

Während der Untersuchungen dieser Arbeit konnte der Autor in seiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur in der Industrie beobachten, dass Entwickler den C&C²-Ansatz meistens verstehen und den potentiellen Mehrwert erkennen. Beispiele erfolgreicher Projekte, in denen mit dem C&C²-Ansatz gearbeitet wurde, begeistern einen Großteil der Personen, die selber am Projekt mitgearbeitet haben oder die Vorgehensweise präsentiert bekommen. Dennoch ist festzustellen, dass sich der Personenkreis mit der selbstständigen Anwendung des C&C²-Ansatzes überfordert fühlen.

Auch ALINK beschreibt Probleme der Probanden bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes:³⁴

- „Einige Probanden hatten Probleme, die Funktionen der Gestalt³⁵ mithilfe des C&C-Ansatzes³⁶ zuzuordnen.“
- „Einige Probanden waren sehr unsicher im Umgang mit den Definitionen des C&C-Ansatzes.“
- „Des Weiteren hatten einige Probanden Schwierigkeiten bei der Darstellung der Dynamik im System.“

Fazit: Eine entscheidende Hürde bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes ist, dass sich potentielle Anwender unsicher fühlen, wie ein C&C²-Modell eines technischen Systems aufgebaut werden kann. Sie haben Probleme die Elemente in einem technischen System zu identifizieren und zu definieren. Sich die Fähigkeiten für eine Anwendung des C&C²-Ansatzes anzueignen, bedeutet zunächst einen Arbeitsaufwand, der nicht direkt zur Zielerreichung des Entwicklungsprojektes beiträgt. Die Motivation dieser Dissertation besteht darin, die Anwendung des C&C²-Ansatzes zu erforschen und Hilfestellungen für die Anwendung des C&C²-Ansatzes zu erarbeiten. Damit soll die Hürde bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes minimiert werden.

³⁴ Alink 2010: S. 156

³⁵ Der Begriff „Gestalt“ umfasst alle geometrischen und stofflichen Eigenschaften des technischen Systems

³⁶ Der C&C²-Ansatz wird in früheren Beiträgen auch als „Elementmodell“, „C&CM“, „C&CM approach“ und „C&C-Ansatz“ bezeichnet. Mehr dazu in Kapitel 2.3

1.2 Aufbau der Arbeit

In der Einleitung wird dargestellt, dass für den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens aus der Invention eine Innovation werden muss. Dafür ist eine effektive Produktgenerationenentwicklung notwendig.

Im Stand der Forschung werden daraus Anforderungen an die Produktentwicklung abgeleitet: es muss Systemverständnis zu bestehenden technischen Systemen aufgebaut werden, um Probleme³⁷ lösen zu können bzw. das technische System zielführend weiter zu entwickeln. Es wird dargestellt, dass Modelle³⁸ in der Produktentwicklung eine wichtige Hilfestellung sind. Im Speziellen wird gezeigt, dass der C&C²-Ansatz den Aufbau von Systemverständnis unterstützt, indem er bei der Analyse und Synthese technischer Systeme eine Hilfestellung darstellt. Fazit von Kapitel 2 ist, dass bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes in Problemlösungs- und Entwicklungsprojekten noch Bedarf für Hilfestellungen besteht. Speziell Heuristiken³⁹ eignen sich, um diese Hilfestellung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes bereitzustellen.

Daraus werden in Kapitel 3 die Zielsetzungen dieser Arbeit abgeleitet: Aus der Untersuchung der Anwendung des C&C²-Ansatzes im industriellen Umfeld werden Heuristiken definiert, die das gewonnene Anwendungswissen wiedergeben und für Anwender bereitstellen. Die Heuristiken sollen dem Anwender helfen, in der Analyse und Synthese technischer Systeme ein C&C²-Modell zu erstellen und somit den Mehrwert, den der C&C²-Ansatz bieten kann, zu nutzen.

Inhalt des 4. Kapitels sind die Methoden, mit denen die Ergebnisse dieser Arbeit erarbeitet und ausgewertet werden. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wird der C&C²-Ansatzes in Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld angewendet, dazu begleitend Diplomarbeiten zur Anwendung des C&C²-Ansatzes geschrieben. Es werden Workshops im industriellen und universitären Umfeld veranstaltet und eine Entwicklungsabteilung im industriellen Umfeld zur Anwendung des C&C²-Ansatzes

³⁷ Siehe Kapitel 2.1: Problem im Sinne eines Deltas zwischen „Ist“ und „Soll“

³⁸ Siehe auch Kapitel 2.2: Modelle dienen als Hilfsmittel, um die Realität zu erfassen und abzubilden; dafür wird die Realität vereinfacht dargestellt; in der Produktentwicklung dienen Modelle der Erfassung der Wiedergabe technischer Systeme, z.B. geben CAD Modelle die Geometrie technischer Systeme wieder

³⁹ Siehe auch Kapitel 2.4: Heuristiken beschreiben mögliche Vorgehensweisen und Lösungswege bei Problemlösungen, wobei sie auf der Erfahrung des Anwenders selber oder dritter Personen beruhen

geschult. Am Ende des Kapitels werden Beispielsysteme vorgestellt, anhand derer die Heuristiken in Kapitel 5 und 6 beschrieben werden.

In Kapitel 5 werden Heuristiken zum Modellaufbau definiert. Sie sollen helfen, C&C²-Modelle gemäß der Basisdefinition aufzubauen. So wird der Anwender unterstützt, Funktionen mit dem C&C²-Ansatz richtig zu definieren und sie in einem C&C²-Modell darzustellen. Die Heuristiken zum Modellaufbau beschreiben z.B. auch, wie die Analyse des technischen Systems hinsichtlich Gestalt und Zeit auf das Wesentliche beschränkt werden kann, bzw. wie ein Teil des technischen Systems in den Fokus der Systemanalyse gesetzt werden kann.

Kapitel 6 definiert Heuristiken zur Modellbildung. Diese sollen helfen, Funktionen und die C&C²-Elemente im technischen System zu identifizieren: Wie können Funktionen und C&C²-Elemente im technischen System sichtbar gemacht werden. Des Weiteren helfen die Heuristiken, die Funktionen und C&C²-Elemente einander zuzuordnen: welche C&C²-Elemente sind Teil welcher Funktionen? Auch helfen die Heuristiken zur Modellbildung die Gestalt in ihren Eigenschaften zu beschreiben, so dass Eigenschaften der Gestalt für eine optimale Funktionserfüllung definiert werden können.

Kapitel 5 und 6 können als Nachschlagewerk benützt werden, wenn eine Hilfestellung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes in den Aktivitäten der Analyse und Synthese technischer Systeme gesucht werden.

Kapitel 7 beschreibt, wie die Heuristiken durch die Anwendung im industriellen Umfeld validiert werden. Wichtige Validierungsmethoden sind hier die Beobachtung und die Befragung der Anwender des Ansatzes mit den Heuristiken in den Industrieprojekten.

In Kapitel 8 wird eine Zusammenfassung der Heuristiken aufgeführt. Zudem wird dargelegt, warum der C&C²-Ansatz in der Kombination mit den Heuristiken in den Entwicklungsprojekten geholfen hat.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 3 dargestellt.

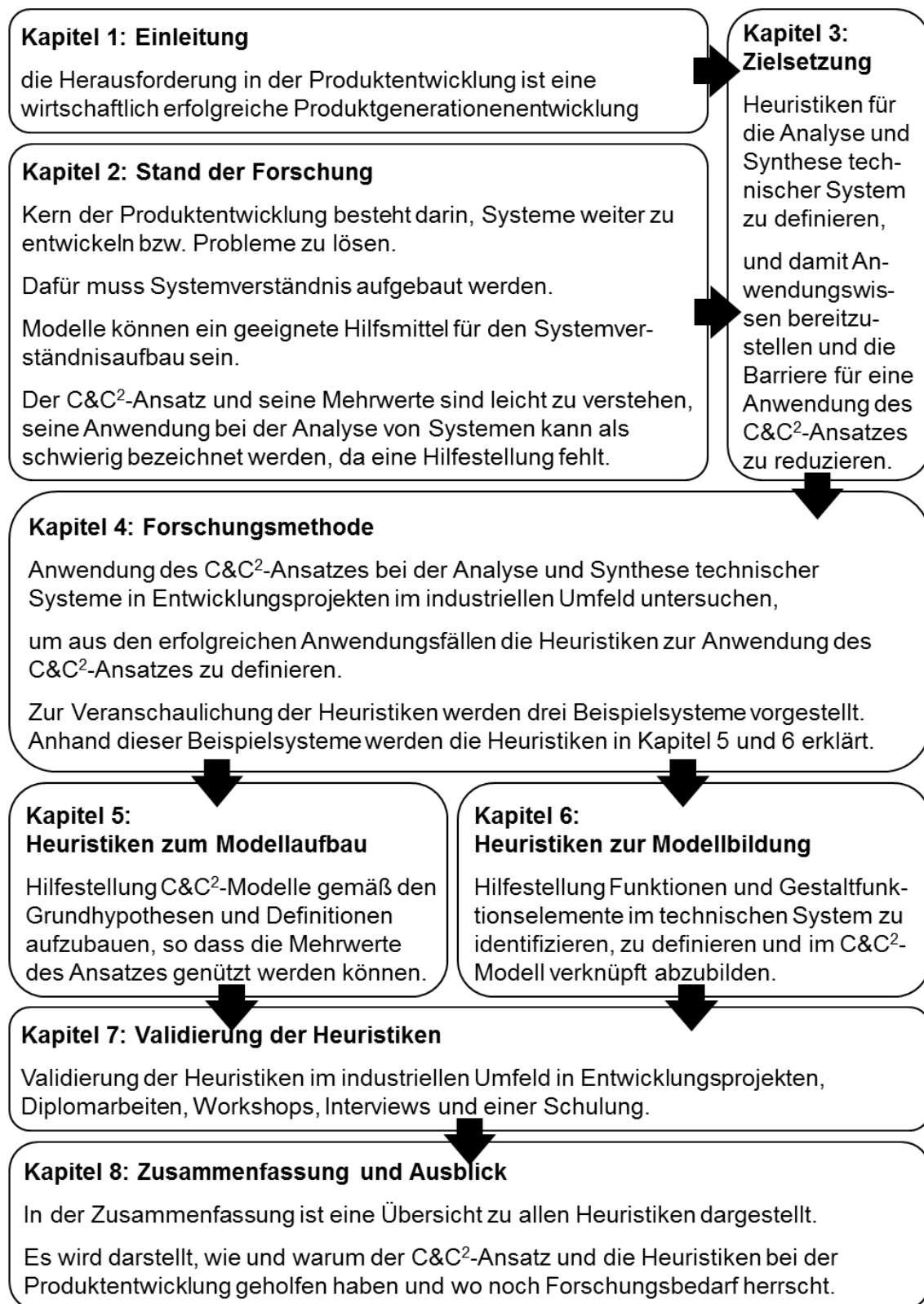


Abbildung 3: Aufbau dieser Arbeit

2 Stand der Forschung

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Argumente der Einleitung aufgegriffen. Der wirtschaftliche Druck in Entwicklungsprojekten erfordert innovative Produktgenerationenentwicklungen. Kern der Entwicklungsaktivitäten ist demnach, bestehende technische Systeme zu analysieren (Analyse), um neue technische Systeme zu entwickeln (Synthese). Die Analyse muss zu einem ausreichenden Systemverständnis führen, so dass das technische System in der Synthese gezielt verändern werden kann (Kapitel 2.1). Modelle können bei der Analyse technischer Systeme bzw. beim Aufbau von Systemverständnis ein wichtiges Hilfsmittel sein (Kapitel 2.2). Mit dem am IPEK⁴⁰ unter der Leitung von ALBERS entwickeltem C&C²-Ansatz können Produktmodelle technischer Systeme erstellt werden, die bei der Analyse und Synthese helfen (Kapitel 2.3). Außerdem wird dargestellt, was Heuristiken sind und warum sie sich dafür eignen, das Anwendungswissen zum C&C²-Ansatz zu formulieren (Kapitel 2.4).

Ziel dieses Kapitels ist, den Stand der Forschung bei der Anwendung des C&C²-Modells aufzuzeigen und daraus den Forschungsbedarf abzuleiten. Abbildung 4 zeigt den Aufbau von Kapitel 2.

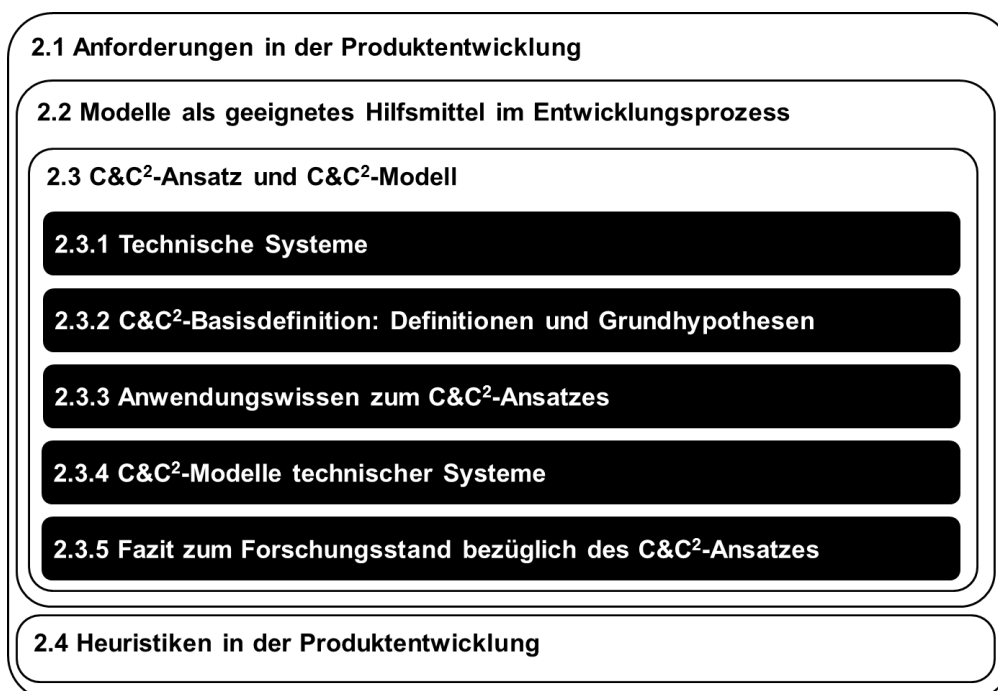


Abbildung 4: Aufbau dieses Kapitels

⁴⁰ IPEK - Institut für Produktentwicklung am KIT, siehe <http://www.ipek.kit.edu>

2.1 Anforderungen in der Produktentwicklung

Wie in Kapitel 1 beschrieben, besteht die Herausforderung in der Produktentwicklung darin, ein bestehendes technisches System „Ist“ so zu modifizieren, dass es dem formulierten „Soll“, oft in Form eines Lasten- bzw. Pflichtenheftes formuliert, entspricht. Dieses „Soll“ kann sich z.B. aus geänderten Kundenanforderungen ergeben. Wenn der Produktlebenszyklus bekannt ist, kann der Entwicklungsprozess vom „Ist“ zum „Soll“ geplant werden. Hierbei spricht ALBERS von der Planungssituation (siehe Abbildung 5 - rechts). Z.B. soll der Kraftstoffverbrauch eines Autos bei der nächsten Generation um 10% reduziert werden. Situationen, in denen das „Ist“ unerwartet vom „Soll“ abweicht, definiert ALBERS als „Notsituation“ (siehe Abbildung 5 - links). Z.B. wenn ein Motorenprototyp in der Entwicklung entgegen der Berechnungen bzw. Simulationen oder ein Motor im Auto des Kunden entgegen der Motorenprototypen einen höheren Kraftstoffverbrauch aufweist.

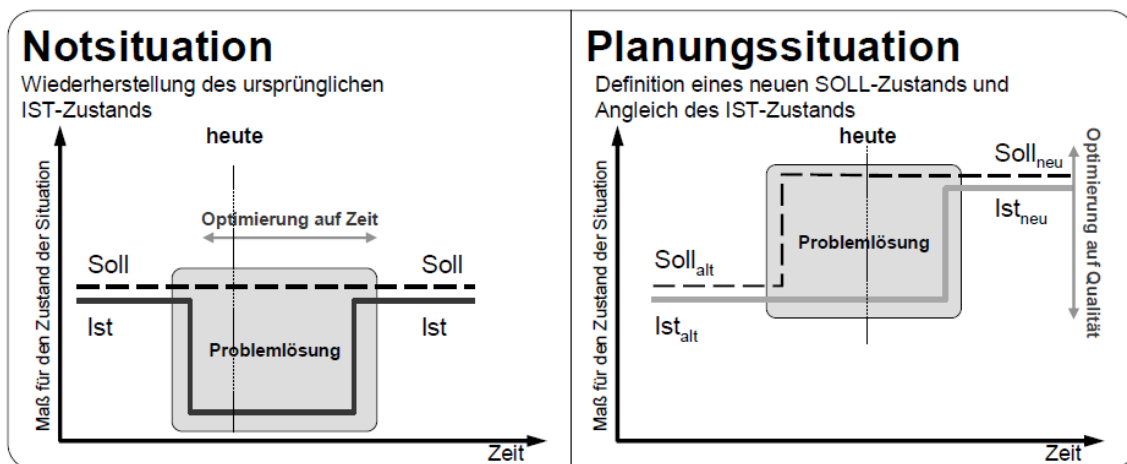


Abbildung 5: Not- und Planungssituation nach ALBERS⁴¹

Ein Problem kann als die Diskrepanz zwischen einem unerwünschten Ausgangszustand bzw. „Ist“ und einem erwünschten End- oder Zielzustand bzw. „Soll“ definiert werden.⁴² Der Prozess vom „Ist“ zum „Soll“ wird in diesem Zusammenhang als „Problemlösung“ bezeichnet werden. Daher kann jede Produktentwicklung als Problemlösung angesehen werden, unabhängig davon, ob es sich um eine

⁴¹ Albers et al 2006

⁴² Vgl. Hussy 1984 auf S. 114

Planungssituation oder um eine Notsituation handelt.⁴³ Ein Ziel von Methoden und Modellen für den Produktentwicklungsprozess muss also sein, den Entwickler bei der Problemlösung zu unterstützen. MEBOLDT formuliert hierzu: „In der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik besitzen Problemformulierung und Problemlösung einen hohen Stellenwert. HUBKA, ROTH, EHRENSPIEL und PAHL/BEITZ sehen wie viele andere Autoren die technische Problemlösung als die zentrale Aufgabe der Ingenieurstätigkeit.“⁴⁴ Auch ALBERS⁴⁵ teilt diese Auffassung.

Welche Anforderungen sind für eine erfolgreiche Problemlösung oder Weiterentwicklung bekannt? ALINK schreibt hierzu: „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.“⁴⁶ Auch für MÜLLER⁴⁷ ist die Analyse des Systems Voraussetzung, um ein Problem zu lösen. Durch die Identifizierung der Defekte des technischen Systems können Teillösungen gefunden werden, die das Gesamtsystem verbessern. MÜLLER geht sogar so weit zu behaupten, dass die Identifizierung und Lösung der Defekte⁴⁸ die Vorgehensweise bei der Problemlösung vorgibt.

Die zielgerichtete Analyse des Problems ist die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Synthese.⁴⁹

Trotz der Wichtigkeit der Analyse werden bei der Beschreibung von Problemlösungsprozessen oder Vorgehensmodellen Synthese und Analyse in einem einzigen Teilschritt zusammengefasst.⁵⁰ Dies trägt der Bedeutung der Analyse nur ungenügend Rechnung. Dagegen betonen Vorgehensmodelle wie SPALTEN⁵¹ und

⁴³ Vgl. Albers et al. 2002, Albers et al 2011b auf S. 3, Deigendesch 2009 auf S. 25 (Deigendesch verweist hier auf Rutz 1985 u. Hacker 1996), Pahl/Beitz et al 2006 und Ehrlenspiel 2007 bzw. VDI2221

⁴⁴ Meboldt 2008: S. 107

⁴⁵ Vgl. Albers et al 2005b auf S. 1

⁴⁶ Alink 2010: S. 19

⁴⁷ Vgl. Müller 1990 auf S. 55

⁴⁸ Ursache für die Abweichung von „Soll“ und „Ist“

⁴⁹ Vgl. Matthiesen 2011 auf S. 4

⁵⁰ Vgl. Daenzer et al 1999 auf S. 96

⁵¹ Vgl. Albers et al 2002, Albers et al 2005b und Albers et al 2011

Münchener Vorgehensmodell MVM⁵² die Analyse, da sie als wichtiger Teil der erfolgreichen Problemlösung erkannt wurde. Auch EHRENSPIEL⁵³ unterscheidet in seinem Vorgehenszyklus zwischen „Aufgabe klären“ (entspricht Analyse) und Lösungen suchen (entspricht Synthese).

Durch die Analyse technischer Systeme entstehen Ideen⁵⁴, wie das technische System verändert werden kann, um es in seiner Funktionsweise zu verbessern. Wird die Analyse unzureichend durchgeführt, wird auch die Qualität der entwickelten Lösungen (Synthese) geringer sein.⁵⁵

Der Prozess der Produktentwicklung besteht dabei selten aus einer Analyse- und einer anschließenden Synthesephase, sondern eher aus einem ständigen Wechsel zwischen diesen Phasen. Oft wird das technische System gemäß den in der Analyse gewonnen Ideen verändert (Synthese), um es anschließend wieder zu analysieren. Diese bewussten Veränderungen des technischen Systems für die Analyse sind eine wichtige Vorgehensweise in der Produktentwicklung.⁵⁶ Mit zunehmendem Systemverständnis werden die Analyse und die Synthese des technischen Systems zielgerichteter, bis schließlich eine ausreichend zielführende Lösung gefunden ist.

Fazit: Die Weiterentwicklung bzw. die Problemlösung sind zentrale Aufgaben in der Produktentwicklung. Hierbei ist die Analyse des technischen Systems die Grundvoraussetzung, um potentiell zielführende Syntheseschritte entwickeln zu können.⁵⁷ Hieraus gibt sich ein iterativer Prozess zwischen Analyse und Synthese⁵⁸, in dem bei weitem nicht jede Analyseerkenntnis und nicht jeder Syntheseschritt zielführend ist.

⁵² Vgl. Lindemann 2007 auf S. 46

⁵³ Vgl. Ehrlenspiel 2007 auf S. 383

⁵⁴ Ideen als mögliche Syntheseschritte, wobei nicht jeder Syntheseschritt zur endgültigen Zielerreichung führt, sondern auch zur Erreichung von Zwischenzielen dienen kann.

⁵⁵ Aussage von Albers in einer Diskussion 2011

⁵⁶ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 111

⁵⁷ Vgl. Albers et al 2008d auf S. 1250: Albers bildet die Entwicklungsaktivitäten im IPPEM ab. Dieser integrierte Ansatz ermöglicht den Entwicklungsprozess als verknüpften und kontinuierlichen Problemlösungsprozess in den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung darzustellen. Die Problemlösung findet gemäss dem SPALTEN Prozess statt, in dem die Analyse und die Synthese eine wesentliche Rolle spielen.

⁵⁸ Vgl. Albers et al 2011 auf S. 17

2.2 Modelle als geeignetes Hilfsmittel im Entwicklungsprozess

In der Produktentwicklung werden Modelle für die verschiedenen Zielsetzungen eingesetzt. Z.B. werden Prozessmodelle verwendet, um Entwicklungsprojekte zu steuern. So lassen sich Modelle nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisieren. Beispiele hierfür sind unter anderem bei MEBOLDT⁵⁹, STACHOWIAK⁶⁰ und PONN⁶¹ zu finden. Aus den Anforderungen in Kapitel 2.1 abgeleitet, sind in diesem Zusammenhang Modelle von Interesse, die eine Hilfestellung zum Aufbau von Systemverständnis bieten. Wie ALBERS⁶² und MATTHIESEN⁶³ beschreiben, kann Systemverständnis als die Verknüpfung von Funktion und Gestalt bezeichnet werden. Wer verstanden hat, wo und wann im technischen System Funktionen verwirklicht werden, hat das System verstanden.⁶⁴ Hierbei können Produktmodelle⁶⁵ bzw. Mentalmodelle⁶⁶ helfen, das technische System zu beschreiben und zu erklären und damit Systemverständnis aufzubauen und zu dokumentieren.

Die Literatur zu Modellen im Entwicklungsprozess technischer Systeme ist sehr umfangreich. Weitestgehende Einigkeit herrscht darüber, dass Modelle für den Produktentwicklungsprozess ein entscheidendes Hilfsmittel sind:⁶⁷

- ALBERS merkt an, dass das „Aufbauen von Modellen bei der Problemlösung ... eine grundlegende Konstruktionsmethode“⁶⁸ ist. Der Entwickler erfasst das technische System über Modelle.⁶⁹

⁵⁹ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 201

⁶⁰ Vgl. Stachowiak 1983 auf S. 129f

⁶¹ Vgl. Ponn 2007 auf S. 36ff

⁶² Vgl. Albers et al 2002b

⁶³ Vgl. Matthiesen 2011 auf S. 5

⁶⁴ Vgl. Alink 2010 auf S. 199

⁶⁵ Vgl. Ponn/Lindemann 2008 auf S. 8f: „Produktmodelle stellen formale Abbilder realer Produkteigenschaften dar. Sie entstehen zum Beispiel zum Zweck der Analyse durch Abstraktion eines komplexen Sachverhaltes und trennen das für die jeweilige Aufgabe Wesentliche vom Unwesentlichen.“

⁶⁶ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 202: „Gemeinsame Mentalmodelle sind Modelle für Denk-, Beschreibungsmuster und Ontologie von Realitätsbereichen. Mentale Modelle sind die essentielle Voraussetzung jeder Methodik, da nur auf dieser Ebene eine Intersubjektivität geschaffen werden kann, die Ausgangsbasis eines gemeinsamen Verständnisses ist. Es ist die gemeinsame Sprache, die im Verständnis und Denken von Personen manifest ist, im Umgang mit komplexen Problemen selbstverständlich sein muss und von allen in der Zusammenarbeit verstanden und akzeptiert wird. Intersubjektive Mentalmodelle sind das Fundament der Produktentstehung.“

⁶⁷ Vgl. Müller 2008

- PONN/LINDEMANN schreiben: Modelle sind ein „gegenüber einem Original zweckorientiert vereinfachtes, gedankliches oder stoffliches Gebilde, das Analogien zu diesem Original aufweist und so bestimmte Rückschlüsse auf das Original zulässt.“⁷⁰

MEBOLDT⁷¹ und OERDING⁷² haben sich mit der Rolle von Modellen in der Produktentwicklung weiterführend auseinandergesetzt. Sie haben in ihren Beiträgen die Modelle und Methoden des IPEK in Bezug auf die Forschungslandschaft in diesem Feld untersucht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist, dass „die Produktentstehung ... heute mehr denn je ein multidisziplinärer und teambasierter Prozess“⁷³ ist. Da Systemverständnis immer subjektiv ist, muss es explizit gemacht werden, damit sich die Teammitglieder darüber austauschen können.⁷⁴ Auf diese Weise können die Teammitglieder zu einem gemeinsamen, intersubjektiven⁷⁵ Systemverständnis kommen.⁷⁶ „Das Schlimmste [für die Entwicklungsarbeit im Team] ist, wenn einer im Team denkt, dass er weiß, wie das System funktioniert.“⁷⁷ Modelle können hier einen wichtigen Beitrag leisten, indem sie das Systemverständnis explizit machen. Der Erfolg der Teamarbeit hängt auch davon ab, ob in der Gruppenarbeit ein gemeinsames Modell erstellt wird.⁷⁸

2.2.1 Informationsgehalt der Modelle

In der Produktentwicklung sehen sich Entwickler mit dem Problem konfrontiert, dass Modelle, die in der Praxis zur Beschreibung des technischen Systems benützt werden,

⁶⁸ Albers et al 2007: S. 3

⁶⁹ Vgl. Oerding 2009 auf S. 33

⁷⁰ Ponn/Lindemann 2008: S. 395

⁷¹ Vgl. Meboldt 2008

⁷² Vgl. Oerding 2009

⁷³ Meboldt 2008: S. 131

⁷⁴ Vgl. Albers et al 2008c auf S. 5

⁷⁵ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 103f: „Intersubjektives Systemverständnis“ wird in diesem Zusammenhang als ein gemeinsames Verständnis über ein technisches System verstanden. Das bedeutet, dass das Systemverständnis aller Teammitglieder ausreichend identisch ist, um die Projektziele zu erreichen. Meboldt bezieht sich hier auf Habermas 1988 und Hars 1994

⁷⁶ Vgl. Alink 2010 auf S. 172

⁷⁷ Alink 2010: S. 62

⁷⁸ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 201

oft entweder die Gestalt oder die Funktion wiedergeben⁷⁹, oder diese auf verschiedenen Ebenen darstellen und verknüpfen.⁸⁰ Ein Beispiel in diesem Zusammenhang wäre eine Funktionsstruktur bzw. ein Funktionsmodell und eine technische Zeichnung bzw. ein CAD Modell eines Systems. Eine technische Zeichnung beinhaltet ausschließlich Informationen zur Gestalt, was für den Anwender gut nachzuvollziehen ist, da diese Informationen sehr konkret sind. Eine technische Zeichnung kann sowohl grob als auch sehr detailliert sein (siehe Abbildung 6 – linke Darstellung, linker Teil), aber sie enthält keine Informationen zu den Funktionen des technischen Systems. Bei Diskussionen anhand von technischen Zeichnungen besteht die Gefahr, dass versucht wird Funktionen mit einzelnen Bauteilen zu optimieren. Dies kann zu Denkfehlern führen, da erst die Interaktion von Bauteilen zu Funktionen führen kann.

Funktionsstrukturen hingegen geben wieder (sowohl sehr grob als auch sehr detailliert), welche Funktionen und welche Zusammenhänge zwischen den Funktionen des technischen Systems existieren, ohne dabei Informationen zur Gestalt zu beinhalten (siehe Abbildung 6 – linke Darstellung, rechter Teil). Es ist nicht praxisgerecht, die Funktionen von der Gestalt zu trennen, weil dann die Betrachtung des technischen Systems abstrakt wird. Deshalb werden Funktionsstrukturen in der Praxis kaum verwendet.⁸¹ ALINK schreibt hierzu: „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 sind.“⁸² Es müssen also bestehende Systeme analysiert werden. Eine Abstraktion des technischen Systems, so dass im Modell nur Funktionen und keine Gestalt wiedergegeben werden, ist für den Anwender schwierig zu handhaben und oft nicht praxisgerecht. OERDING⁸³ schreibt hierzu, dass der Entwickler wissen muss, welche Gestaltelemente die Funktionen ausführen. Nur so können die Funktionen durch Modifikationen der Gestalt verändert werden, damit sie den Kundenanforderungen entsprechen. Aus diesem Grund spielen Skizzen, in denen Gestalt und Funktionen bzw. Wirkungen kombiniert dargestellt werden können, in der

⁷⁹ Vgl. Albers et al 2011

⁸⁰ Vgl. Ponn 2007 auf S. 114ff

⁸¹ Vgl. Matthiesen 2011 auf S. 7

⁸² Alink 2010: S S21, verweist dabei auf Eckert et al 2004

⁸³ Vgl. Oerding 2009 auf S. 33

Produktentwicklung trotz CAD und ähnlichen Hilfsmitteln immer noch eine wichtige Rolle.⁸⁴

Zwischenfazit: Für die Unterstützung in der Analyse und Synthese von technischen Systemen sind (Produkt-) Modelle notwendig, die die Verknüpfung von Funktion (inkl. Wirkung und Effekte) und Gestalt unterstützen und somit helfen, Systemverständnis aufzubauen. Mit Hilfe von diesen Modellen kann Systemverständnis explizit gemacht werden und beim Arbeiten in der Gruppe ein intersubjektives Systemverständnis erlangt werden.

Für diese Anforderungen hat ALBERS⁸⁵ den C&C²-Ansatz entwickelt (Abbildung 6 rechts). In einem C&C²-Modell wird durch die Verknüpfung von Funktion und Gestalt immer zwingend beides dargestellt. Dementsprechend werden auch die Informationen zwischen den abstrakten (Funktion) und konkreten (Gestalt) verknüpft.⁸⁶ Ein C&C²-Modell kann beliebig detailliert bzw. grob dargestellt werden

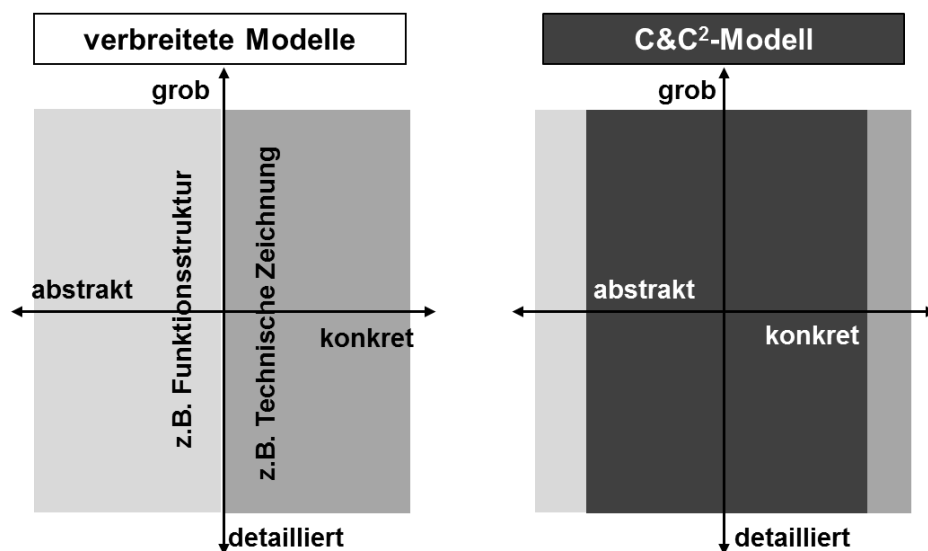


Abbildung 6: Produktmodelle und Ihre Möglichkeit abstrakte Funktionen und konkrete Gestalt in verschiedenen Detaillierungsstufen darzustellen

Im Folgenden wird auf weitere Vorteile von Modellen in der Produktentwicklung eingegangen. Z.B. bemerken Ingenieure oft erst ob sie ein technisches System ausreichend verstanden haben, wenn sie versuchen ihr Verständnis zum technischen System in einem Modell zusammenzufassen, besonders wenn sie das Modell dabei

⁸⁴ Vgl. Pache 2005 auf S. 50ff

⁸⁵ Vgl. Albers/Matthiesen 2002

⁸⁶ Vgl. Albers et al 2007

darstellen. Die Modellbildung hilft folglich bei der Validierung der Analyseerkenntnisse.⁸⁷ Produktmodelle können den Anwender auch bei seinem Vorgehen unterstützen, da sie die Möglichkeit bieten, das technische System mit dem Modell schrittweise zu erfassen.⁸⁸ Modelle helfen die Kapazität des menschlichen Kurzzeitgedächtnisses zu vergrößern, indem die Informationseinheiten zu technischen Systemen strukturiert dargestellt werden und damit schnell abrufbar sind.⁸⁹

2.2.2 Abbildung der Eigenschaften des technischen Systems im Modell

PAHL/BEITZ schreiben: „... in technischen Systemen findet ... ein Umsatz von Energie, Stoff und/oder Signalen statt, der durch Quantitäts-, Qualitäts- und Kostenangaben präzisiert werden muss ... Bei jedem Umsatz der beschreibenden Größe muss Quantität und Qualität beachtet werden, um ein eindeutiges Kriterium für die Präzisierung der Aufgabe, für die Auswahl der Lösungen und für eine Bewertung zu erhalten.“⁹⁰ Das bedeutet, dass Modelle zur Analyse von technischen Systemen sowohl qualitative, als auch quantitative Aussagen enthalten müssen, um das „Ist“ und das „Soll“ eines technischen Systems definieren zu können. EHRENSPIEL spricht von „Merkmalen“ des Systems, sie basieren z.B. auf Beobachtungen, Messergebnissen, etc.⁹¹ Er unterscheidet zwischen „Bedeutung“ und „Ausprägung“ der Merkmale: Bedeutung umfasst qualitative Aussagen und Ausprägungen sind quantitative Aussagen zu den Merkmalen. WEBER⁹² unterscheidet zwischen „Characteristics“ (auf Deutsch: „Merkmale“) und „Properties“ (auf Deutsch „Eigenschaften“). Merkmale beschreiben eher die Gestalt des technischen Systems, wie z.B. Struktur, Dimension, Material und Oberflächenbeschaffenheit des Produktes. Die Merkmale können durch den Entwickler direkt festgelegt werden. Wogegen Eigenschaften mehr das „technische Verhalten“ des technischen Systems beschreiben, wie z.B. Funktion, Sicherheit, Zuverlässigkeit, ästhetische Eigenschaften, Herstellbarkeit, Montagefreundlichkeit, Umweltfreundlichkeit und Kosten. Die Eigenschaften können

⁸⁷ Vgl. Alink 2010 auf S. 61

⁸⁸ Der Begriff „Erfassen“ beinhaltet in diesem Zusammenhang verstehen, darstellen, (vereinfacht) abbilden, dokumentieren des Systems

⁸⁹ Vgl. Meboldt 2008 auf S.107

⁹⁰ Pahl/Beitz et al 2006: S. 43

⁹¹ Vgl. Ehrlenspiel 2007 auf S. 29

⁹² Vgl. Weber 2008 auf S. 70

nicht direkt durch den Entwickler beeinflusst werden. Für WEBER werden in der Analyse die Eigenschaften eines Systems mit gegebenen Merkmalen bestimmt. In der Synthese sieht er die Umsetzung der geforderten Eigenschaften (z.B. im Lasten oder Pflichtenheft) durch die Festlegung der Merkmale eines Produktes. Die Definition der geeigneten Merkmale ist für WEBER die Hauptaktivität in der Produktentwicklung. FELDHUSEN beschreibt in diesem Zusammenhang die Synthese bzw. den Gestaltungsprozess⁹³ als einen ständigen Wechsel zwischen qualitativem und quantitativem Gestalten (siehe Abbildung 7).

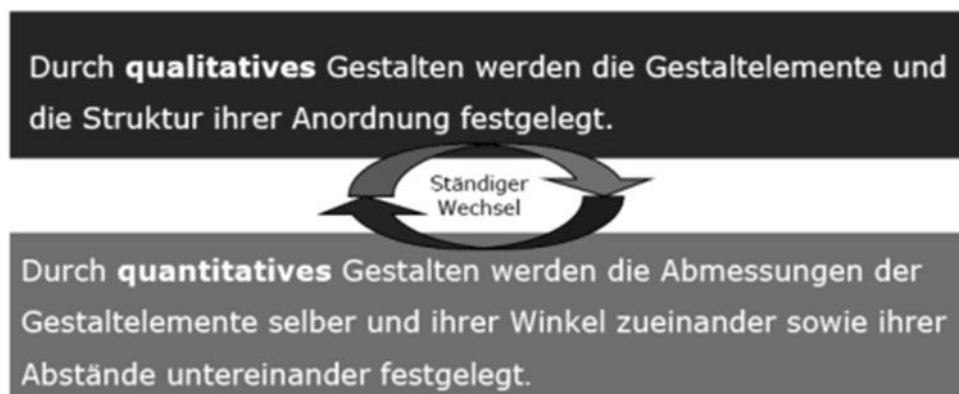


Abbildung 7: der Gestaltungsprozess läuft nach Feldhusen⁹⁴ auf zwei Ebenen ab

HUBKA⁹⁵ unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen „internal properties“, den Eigenschaften der Gestalt, und „external properties“, den Eigenschaften des Systemverhaltens. SUH⁹⁶ bezeichnet diese als „design parameters“ und „functional requirements“. EHRENSPIEL definiert in diesem Zusammenhang zwischen den folgenden Merkmalskategorien und bezieht sich dabei auf die DIN 2330.⁹⁷

- Beschaffenheitsmerkmale: können am Produkt selber festgestellt werden, wie „z.B. Gestalt, Werkstoff, Farbe, Verbindungsart“. Die Beschaffenheit dieser Merkmale bestimmen die „Funktionsmerkmale“ und die „Relationsmerkmale“
- Funktionsmerkmale: sie „bezeichnen den gewollten Zweck eines Produktes, wie z.B. das zu übertragende Drehmoment oder den zu messenden Temperaturbereich“

⁹³ Vgl. Feldhusen 2010 - Gestaltungsprozess als Syntheseprozess

⁹⁴ Aus einer Diskussion mit Feldhusen 2010; Abbildung aus Feldhusen 2010

⁹⁵ Vgl. Hubka et al 1996

⁹⁶ Vgl. Suh 1990

⁹⁷ Ehrlenspiel 2007: S. 29 und DIN-Norm 2330

- Relationsmerkmale: „sind Eigenschaften eines Produkts, die erst im Zusammenhang mit anderen Systemen (oder mit Menschen) von Bedeutung sind“, wie z.B. „Spannungen und Verformungen aufgrund äußerer Kräfte, Geräusche, Passungen, Kosten, Bedienbarkeit oder Umweltbelastung.“

Das heißt, es kann zwischen Eigenschaften, bzw. Merkmalen unterschieden werden, die die Gestalt und die Funktion eines technischen Systems beschreiben.

Ähnlich wie EHRENSPIEL beschreibt MATTHIESEN in der „mengentheoretischen Betrachtung“⁹⁸, dass die technischen Funktionen alleine durch die stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Bauteile bestimmt werden. Wobei hierbei nur die Oberflächen und Materialstrukturen der Bauteile gemeint sind, die Kräfte und Informationen übertragen. Damit stellt MATTHIESEN den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Funktion (entspricht dem Begriff „Merkmale“) und den Eigenschaften der Gestalt her (entspricht dem Begriff „Eigenschaften“). Um die Eigenschaften der Gestalt auf die Funktion detaillierter betrachten zu können, bestimmt MATTHIESEN erst die Wirkung der einzelnen Gestaltelemente. Das Zusammenspiel aller Wirkungen bestimmt die Funktionseigenschaften.

Bei der Entwicklung technischer Systeme muss folglich nicht nur bestimmt werden, wo in der Gestalt des technischen Systems die Funktionen ausgeführt werden (qualitative Aussage), sondern auch wie die Eigenschaften der Gestalt die Eigenschaften der Funktion bestimmen (quantitative Aussage). Es ist also z.B. nicht nur notwendig zu wissen, dass die Bremsbacken auf der Felge eines Fahrrades bei der Funktion „Geschwindigkeit reduzieren“ beteiligt sind, sondern auch wie die Eigenschaften der Bremsbacken und der Felgen beschaffen sein sollten, um optimale Eigenschaften der Bremsfunktion zu erzielen. Z.B. können veraltete (sie besitzen z.B. andere stoffliche Eigenschaften) Bremsbacken zu einer Reduzierung der Bremsfunktion führen. Bei einem rein qualitativen Verständnis wäre zwar bekannt, dass die sich berührenden Oberflächen von Bremsbacke und Felge an der Bremsfunktion beteiligt sind, kann aber nicht beschreiben, warum die Bremsfunktion der veralteten Bremsklötze geringer ist.

Fazit: Bei der Entwicklung technischer Systeme muss nicht nur ein qualitatives, sondern auch ein quantitatives Systemverständnis mit Hilfe von Modellen aufgebaut werden. Qualitatives Systemverständnis verknüpft Funktion und Gestalt, quantitatives

⁹⁸ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 57ff

Systemverständnis verknüpft die Eigenschaften der Funktion mit den Eigenschaften der Gestalt. Dazu müssen Funktion und Gestalt quantitativ beschrieben werden (siehe Abbildung 8).

Quantitative Aussagen zu Funktionen sind z.B. Bremsleistung, Kraft, Drehmoment, Einschraubzeit, Setzausfallrate, Kundenakzeptanz, etc.

Quantitative Aussagen zur Gestalt sind z.B. Daten zur Geometrie (Länge, Breite, Höhe, etc.), Materialeigenschaften (Härte, chemische Zusammensetzung, Materialstruktur, etc.) und Lage der sich berührenden Oberflächen zwischen den Bauteilen und Angaben, wo im Bauteil die Kraft oder Information übertragen wird.

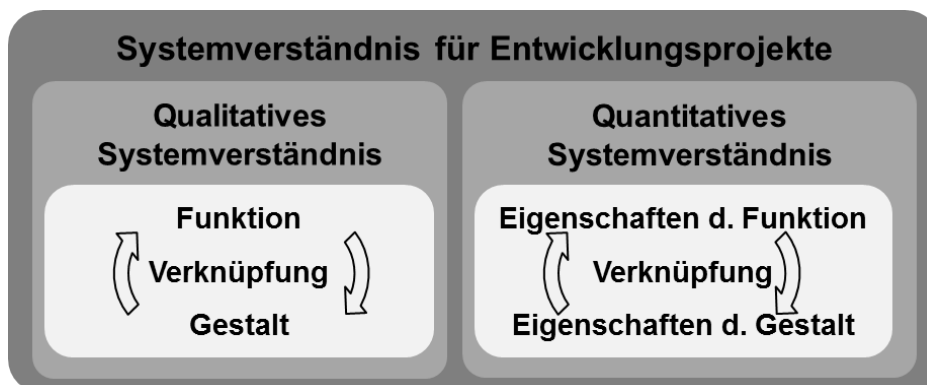


Abbildung 8: qualitatives und quantitatives Systemverständnis durch Verknüpfung von Gestalt und Funktion, bzw. von Eigenschaften der Funktion und der Gestalt

2.3 C&C²-Ansatz und C&C²-Modell

Der Contact and Channel Connector Ansatz (C&C²-Ansatz) dient zur Erstellung von Modellen technischer Systeme (C&C²-Modell), mit dem Ziel die Produktentwicklung zu unterstützen.⁹⁹ ALINK gibt in seinem Beitrag¹⁰⁰ einen Abriss der Entwicklung des C&C²-Ansatzes seit seiner ersten Nennung im Jahr 1999.¹⁰¹ Der C&C²-Ansatz hat sich mittlerweile in einem sehr breiten Einsatzgebiet bewährt und ist in den iPeM¹⁰² integriert worden. Da Entwicklung auch immer Problemlösung ist, wurde aufgezeigt,

⁹⁹ Vgl. Matthiesen 2011 auf S. 8

¹⁰⁰ Vgl. Alink 2011 auf S. 46ff

¹⁰¹ Vgl. Albers et al 1999 auf S. 7

¹⁰² Vgl. Albers 2010 auf S. 7: integrierten Produktentstehungsmodells des IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT

wie der C&C²-Ansatz im iPeM mit dem Problemlösungsprozess SPALTEN¹⁰³ kombiniert werden kann. Der C&C²-Ansatz wurde bei der Entwicklung mechanischer¹⁰⁴ und mechatronischer¹⁰⁵ Systeme angewendet. So wurde aufgezeigt, wie der C&C²-Ansatz bei Vehicle-in-the-Loop Entwicklungsprozessen in Kombination mit SysML und SPALTEN verwendet wurde. MARQUES¹⁰⁶ beschreibt die Anwendung des C&C²-Ansatzes in Kombination mit „Axiomatic Design“¹⁰⁷. ALBERS und ENKLER zeigen auf, wie der C&C²-Ansatz in Simulationsprozessen und in CAD integriert werden kann, um eine durchgängige Modellierung zu ermöglichen.¹⁰⁸

Im Folgenden wird darauf eingegangen, was unter dem C&C²-Ansatz zu verstehen ist, warum und wie er den Entwickler unterstützen kann und welche Hilfestellungen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes bzw. zum Aufbau von C&C²-Modellen bei der Analyse und Synthese technischer System existieren.

Information zur Nomenklatur des C&C²-Ansatzes:

Die Bezeichnung des C&C²-Ansatzes änderte sich im Laufe der Jahre. ALBERS definierte den Begriff „C&CM“, abgeleitet von der englischen Bezeichnung des Modells „Contact & Channel Model“. Der Begriff C&CM stand bis 2007 als Synonym für die Basisdefinition, das Anwendungswissen und für mit dem Ansatz aufgebaute Modelle technischer Systeme, wobei teilweise zwischen „C&CM“ (der Ansatz) und „C&CM approach“ (das Vorgehen) unterschieden wurde.¹⁰⁹ Durch die zahlreichen Forschungsprojekte zur Anwendung des Ansatzes innerhalb und außerhalb der Universität in den Jahren 2007 bis 2010 wurde der Bedarf erkannt, den Begriff „C&CM“ schärfer zu definieren. Im Forschungsteam um ALBERS wurde der Begriff „C&C²“ eingeführt, wobei zwischen dem C&C²-Ansatz und C&C²-Modellen technischer Systeme unterschieden wird.¹¹⁰ Die drei „C“ stehen für „Contact“, „Channel“ und „Connector“. Der Connector ist in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Der C&C²-Ansatz beinhaltet die Basisdefinition und das Anwendungswissen zur Basisdefinition. Ein C&C²-Modell ist eine (meist explizite) Erfassung bzw. Darstellung des technischen

¹⁰³ Vgl. Albers et al 2011

¹⁰⁴ Vgl. Albers et al 2008b

¹⁰⁵ Vgl. Albers et al 2010

¹⁰⁶ Vgl. Marques et al 2009

¹⁰⁷ Vgl. Suh 2001

¹⁰⁸ Vgl. Albers et al 2009b und Albers et al 2011c

¹⁰⁹ Vgl. Albers et al 2004b

¹¹⁰ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Systems als Modell, das mit den Elementen und gemäß der Definitionen und Grundhypothesen der C&C²-Basisdefinition erstellt wird.

Was ist der C&C²-Ansatz?

ALBERS bezeichnet den C&C²-Ansatz als strukturierende Hilfestellung bei der Analyse und Synthese technischer Systeme. Der Ansatz bietet die Möglichkeit technische Systeme so darzustellen bzw. zu beschreiben, dass zu jeder Funktion die Orte¹¹¹ in der Gestalt zugewiesen werden können.¹¹² Ermöglicht wird dieses durch die Elemente Wirkflächenpaar¹¹³ (WFP) und Leitstützstruktur¹¹⁴ (LSS). Sie werden sowohl über die Gestalt, als auch die Funktion definiert. Damit müssen Funktionen in einem C&C²-Modell immer auf konkreter Produktebene verknüpft werden. Diese Verknüpfung findet auf verschiedenen Detaillierungsebenen statt.¹¹⁵ Wobei die Verknüpfung nicht immer die Gestalt mechanischer Systeme haben muss, sondern auch der Quellcode in einem Softwareprogramm sein kann.¹¹⁶ Funktionen können als Wechselwirkungen von Wirkflächenpaaren (WFP) und die sie verbindenden Leitstützstrukturen (LSS) beschrieben werden. Connectoren (C) dienen hierbei dazu, das technische System in das Systemumfeld einzubinden und Wechselwirkungen zu erfassen.¹¹⁷ Damit kann der C&C²-Ansatz „helfen, Ziele und Randbedingungen von Produktentstehungsprozessen auf individuelle Komponenten eines Produkts abzubilden.“¹¹⁸

Auf Basis seiner Forschungsarbeit am IPEK unter der Leitung von ALBERS definiert MATTHIESEN den C&C²-Ansatz als „einen konstruktionsmethodischen Ansatz, der technische Systeme auf ‚das Wesentliche‘ abstrahiert.“¹¹⁹ Er sieht den Nutzen des Ansatzes „... wenn die Gestalt eines technischen Systems eine Rolle spielt. Im Produktentwicklungszyklus ist dies der Fall, wenn eine Analyse des bereits bestehenden oder des zu entwickelnden Produktes notwendig ist, oder wenn neue Gestaltelemente gestaltet werden.“¹²⁰ Dies entspricht den Anforderungen aus

¹¹¹ Siehe Kapitel 5.3: Orte der Funktionserfüllung

¹¹² Vgl. Albers et al 2011b auf S. 1

¹¹³ Siehe Kapitel 2.3.2

¹¹⁴ Siehe Kapitel 2.3.2

¹¹⁵ Vgl. Albers et al 2011b auf S. 7

¹¹⁶ Aus einer Diskussion zwischen Albers und Autor am 2011

¹¹⁷ Vgl. Albers et al 2011 auf S. 18

¹¹⁸ Albers et al 2011b: S. 6

¹¹⁹ Matthiesen 2002: S. 142ff

¹²⁰ Matthiesen 2002: S. 27

Kapitel 2.1. MATTHIESEN beschreibt den C&C²-Ansatz als Metamodell, um Modelle technischer Systeme bei der Analyse und Synthese zu erstellen. Er bezeichnet den C&C²-Ansatz als „Denkzeug“ das hilft, komplexe Systeme zu erfassen, indem die relevanten Funktionen mit der Gestalt in C&C²-Modellen verknüpft dargestellt werden können.¹²¹

LEMBURG sieht im C&C²-Ansatz bzw. C&C²-Modellen technischer Systeme ein gedankliches Modell, das dem Verständnis und der Dekomposition von Prinzip-Lösungen dient.¹²²

OHMER bezeichnet den C&C²-Ansatz als „Denkmodell“, „das es ermöglicht, den Zusammenhang zwischen der Funktion technischer Systeme und deren Gestalt einfach und auf effektive Weise zu beschreiben.“ Der C&C²-Ansatz „basiert auf einer exakten Definition des physikalischen Ortes, an dem eine betrachtete technische Funktion erfüllt wird.“¹²³

MEBOLDT fasst die Forschungsarbeit von ALBERS zusammen und definiert den C&C²-Ansatz¹²⁴ als „konstruktionsmethodisches Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt technischer Systeme ... Auf Basis von drei Grundhypothesen schafft das Modell die Grundlage, um mit Logik und einer Modellsprache technische Systeme zu modellieren und damit den Zusammenhang von Funktion und Gestalt komplexer Systeme klar zu beschreiben.“¹²⁵ Für MEBOLDT gehört der der C&C²-Ansatz, bzw. die C&C²-Modell zu den essentiellen mentalen Modellen aus dem Karlsruher Ansatz für Produktentstehung, die Basis „jeglichen Denkens“ sind.¹²⁶

Zwischenfazit: Die Grundhypothesen (GH) beschreiben, wie mit WFP, LSS und Connectoren die Funktionen und die Gestalt eines technischen Systems verknüpft und in einem C&C²-Modell erfasst, dargestellt und diskutiert werden können. Auf diese Weise kann Systemverständnis aufgebaut und in expliziten C&C²-Modellen dargestellt werden.

¹²¹ Vgl. Matthiesen 2011 auf S. 8

¹²² Vgl. Lemburg 2009 auf S. 15

¹²³ Ohmer 2008: S. 15

¹²⁴ Wenn Meboldt in diesem Zitat vom Modell spricht, meint er den C&C²-Ansatz und die damit aufgebauten C&C²-Modelle technischer Systeme

¹²⁵ Meboldt 2008: S. 55

¹²⁶ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 201f

Warum hilft der C&C²-Ansatz dem Anwender?

ALBERS schreibt hierzu, dass der C&C²-Ansatz hilft, technische Systeme (IST-Zustand) und die an das technische System gestellte Anforderungen (SOLL-Zustand) darzustellen.¹²⁷ Der Entwickler hat mit dem C&C²-Ansatz die Möglichkeit, abstrakte Funktionen mit konkreter Gestalt zu verknüpfen¹²⁸ und somit Wechselwirkungen zwischen den Elementen und Funktionen zielgerichtet zu erfassen.¹²⁹ Auf diese Weise können mittels eines C&C²-Modells technische Systeme bzw. Probleme erfasst und nach Lösungen gesucht werden. Z.B. indem bekannte Funktionen und Gestaltelemente neu verknüpft, neue Funktionen und Gestaltelemente definiert oder bestehende Funktionen und Gestaltelemente eliminiert werden. „Der C&C²-Ansatz kann helfen, Ziele und Randbedingungen von Produktentstehungsprozessen auf individuelle Komponenten eines Produktes abzubilden.“¹³⁰ Der C&C²-Ansatz unterstützt, ohne dem Anwender feste Prozessschritte zum Modellaufbau vorzugeben und dieser sein gewohntes Vorgehen verwerfen muss.¹³¹ Weiter beschreibt ALBERS¹³², wie die Anwendung des C&C²-Ansatzes den Entwickler davor bewahrt, Funktionen des technischen Systems nicht zielführend zu definieren, z.B. indem er eine Funktion einem einzelnen Bauteil zuordnet. ALBERS¹³³ und MATTHIESEN¹³⁴ beschreiben, warum der C&C²-Ansatz im Problemlösungsprozess helfen kann. Die Verknüpfung von Funktionen und Effekten mit der Gestalt in der Systembeschreibung ermöglicht eine zielführende Beschreibung des Problems. Durch das explizite C&C²-Modell des Systems wird ein gemeinsames Systemverständnis im Team gefördert. Dieses intersubjektive Systemverständnis verbessert die Teamarbeit. ALBERS¹³⁵ und MATTHIESEN betonen, wie der C&C²-Ansatz hilft das Vorgehen zu strukturieren und die Komplexität zu reduzieren: „Über das Wirkflächenpaar wird das ‚Denken‘ des Konstrukteurs vom Bauteildenken wegbewegt, um das für die Funktion relevante, die Wechselwirkung der Bauteile miteinander ins Zentrum der Überlegung zu rücken. Außerdem ist es dynamisch, das heißt auf verschiedenen Detaillierungsstufen immer

¹²⁷ Vgl. Albers 2010 auf S. 6

¹²⁸ Vgl. Albers et al 2008 auf S. 2

¹²⁹ Vgl. Albers et al 2008d

¹³⁰ Albers et al 2011: S. 18

¹³¹ Vgl. Albers et al 2008 auf S. 5

¹³² Vgl. Albers et al 2011b auf S. 6f

¹³³ Vgl. Albers et al 2011b auf S.6 und Albers et al 2008 auf S. 3

¹³⁴ Vgl. Matthiesen et al 2012 auf S. 3

¹³⁵ Vgl. Albers et al 2011c auf S. 6

wieder nach gleicher Art und Weise anwendbar.“¹³⁶ Zeitliche und geometrische Hierarchiestufen können problemangepasst beliebig kombiniert und im Modell dargestellt werden.¹³⁷ Die aufgezählten Punkte beschreiben, warum der C&C²-Ansatz bei der Analyse und Synthese technischer Systeme helfen kann.

OERDING betont als Stärke des C&C²-Ansatzes, dass er „beliebig abstrakt oder konkret anwendbar“¹³⁸ ist. Der Ansatz kann auf CAD Modelle oder an fertigen Produkten angewendet werden. Den Anwendungsbereich des C&C²-Ansatzes sieht OERDING in der Modellierung eines technischen Systems, was er als den „Kern der Produktentstehung“¹³⁹ bezeichnet.

Zwischenfazit: Der C&C²-Ansatz hilft (intersubjektives) Systemverständnis aufzubauen, da der Anwender oder die Anwender mit C&C²-Modellen technischer Systeme Funktionen einer Gestalt zuordnen und darstellen können, und sich somit von der getrennten Betrachtung von Funktion und Gestalt wegbewegen. Ermöglicht wird dies durch die Elemente WFP, LSS (welche beide durch Funktion und Gestalt definiert sind) und Connectoren. Ohne dass der Anwender seine gewohnte Arbeitsweise verwerfen muss, wird durch den C&C²-Ansatz eine strukturierte und problemangepasste Arbeitsweise gefördert, die unabhängig vom Detaillierungsgrad immer gleich ist.

Der C&C²-Ansatz in der Produktentwicklung bzw. bei der Problemlösung

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln dargestellt, sind in der Ausgangssituation für die Verwendung des C&C²-Ansatzes (wie er in dieser Arbeit untersucht wird) die Probleme oder die Ziele für Weiterentwicklungen eines bestehenden technischen Produktes bereits bekannt, nicht aber die Problemursachen bzw. die notwendigen Syntheseschritte für die Zielerreichung (siehe Abbildung 9 oben links). Der C&C²-Ansatz wird in dieser Situation dazu verwendet, das technische System für die Problemlösung bzw. Entwicklung zu analysieren, was meist vieler Iterationsschleifen zwischen Analyse und Synthese bedarf (siehe Abbildung 9 unten).

Der C&C²-Ansatz besteht aus der Basisdefinition und dem Anwendungswissen (siehe Abbildung 9 oben mittig). Die Basisdefinition des C&C²-Ansatzes liefert die C&C²-Elemente und die Grundhypothesen, um ein C&C²-Modell aufzubauen. Mit diesem

¹³⁶ Matthiesen 2011: S. 8

¹³⁷ Vgl. Albers et al 2004 auf S. 1ff

¹³⁸ Oerding 2009: S. 137

¹³⁹ Oerding 2009: S. 161

Anwendungswissen kann der C&C²-Ansatz bei den konkreten Problemstellungen bzw. in den Projekten angewendet werden.

Der C&C²-Ansatz wird genutzt, um ein C&C²-Modell des technischen Systems aufzubauen. Das C&C²-Modell kann helfen, das bei der Analyse gewonnene Wissen, die Hypothesen und die Syntheseideen zu dokumentieren, das für die Zielerreichung notwendige Systemverständnis zu erwerben und damit das Problem zu lösen bzw. die Ziele zu erreichen. Es ist wichtig zu beachten, dass jedes C&C²-Modell zweck-, situations- und personenbezogen ist und erhebt daher nicht den Anspruch allgemein gültig oder für nicht beteiligte Personen lesbar zu sein.

Fazit: Der C&C²-Ansatz kann als Hilfestellung bei der Analyse und Synthese technischer Systeme bezeichnet werden. Die C&C²-Basisdefinition definiert die notwendigen Elemente (WFP, LSS, C) und Hypothesen, um Systemverständnis zu einem technischen System in einem C&C²-Modell aufbauen und darstellen zu können. Kern hierfür ist die Verknüpfung von Funktion und Gestalt.

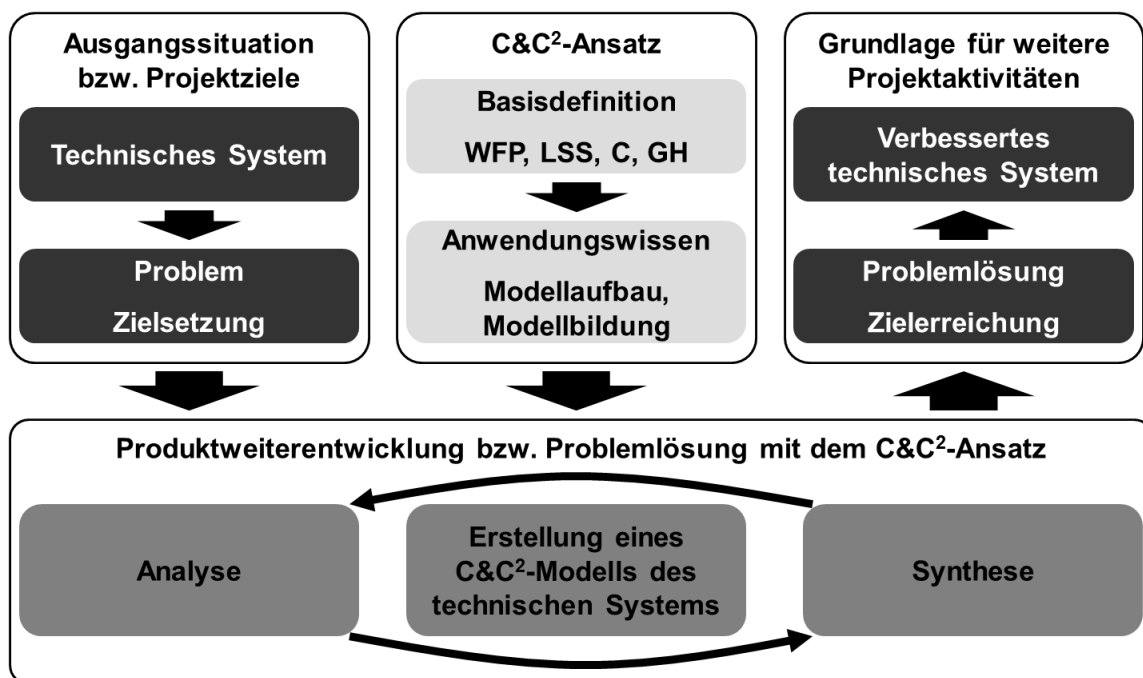


Abbildung 9: Produktentwicklung bzw. Problemlösung mit dem C&C²-Ansatz

2.3.1 Technische Systeme

Im Folgenden wird der Begriff „technisches System“ kurz erörtert und anschließend eine Definition für diese Arbeit abzuleiten.

„Technische Gebilde [...] sind künstliche und konkrete Systeme, die aus einer Gesamtheit geordneter und aufgrund ihrer Eigenschaften miteinander durch Beziehungen verknüpfter Elemente bestehen.“¹⁴⁰

EHRENSPIEL definiert „Technische Systeme sind künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen, also Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken. Sie sind somit Sachsysteme (im oben definierten Sinne). Sieht man vornehmlich das geometrisch-stoffliche Gebilde und weniger den Prozess oder das Verfahren, welches das Gebilde durchführt, so spricht man von einem Technischen Produkt.“¹⁴¹

Die Definition von PAHL/BEITZ lautet: „Technische Gebilde, also auch Erzeugnisse des Maschinen-, Geräte- und Apparatebaus, sind künstliche, konkrete und meist dynamische Systeme, die aus einer Gesamtheit geordneter Elemente bestehen und aufgrund ihrer Eigenschaften miteinander durch Relationen verknüpft sind. Ein System wird weiterhin dadurch gekennzeichnet, dass es von seiner Umgebung abgegrenzt ist, wobei die Verbindung zur Umgebung durch die Systemgrenze geschnitten werden.“¹⁴²

LINDEMANN beschreibt ein System als „Elemente und zwischen ihnen vorhandene Relationen, durch eine Systemgrenze vom Umfeld abgegrenzt und durch Input- und Output-Größen mit diesem Umfeld verbunden.“¹⁴³

MEBOLDT definiert ein System auf Basis von ARISTOTELES¹⁴⁴, PULM¹⁴⁵ und LUHMANN¹⁴⁶ als „die Gesamtheit miteinander verknüpfter und sich gegenseitig beeinflussender Elemente, die entsprechend einem bestimmten Zweck organisiert sind ... Die inneren Wirkweisen und Wechselbeziehungen von Systemen sind oft als schwer durchschaubar und werden daher als komplex bezeichnet. Die Beschreibung von

¹⁴⁰ Dubbel 2005: S. F1

¹⁴¹ Ehrlenspiel 2007: S. 27

¹⁴² Pahl/Beitz et al 2006: S. 17

¹⁴³ Lindemann 2007: S. 334

¹⁴⁴ Vgl. Aristoteles 1907 auf S. 314-316

¹⁴⁵ Vgl. Pulm 2004 auf S. 19.

¹⁴⁶ Vgl. Luhmann 1994 auf S. 16

Systemen erfordert einen hohen Aufwand der Analyse und Kenntnis der zugrunde liegenden Mechanismen und inneren Beziehungen. Um Systeme zu beschreiben und abzubilden, werden Modelle entwickelt, die das reale Systemverhalten repräsentieren können. Nach Forrester haben Menschen keine Alternative zum Denken und Handeln gemäß Modellvorstellungen.“¹⁴⁷

ALBERS¹⁴⁸ und MATTHIESEN¹⁴⁹ definieren, dass mit einem technischen System nicht nur mechanische Systeme gemeint sind, sondern alle technischen Gebilde. Der C&C²-Ansatz kann ebenso auf Fluide, Gase und Felder angewendet werden. Auch elektrische und mechatronische Systeme können mit einem C&C²-Modell beschrieben werden.

Fazit: Als technisches System werden in diesem Beitrag alle künstlich erzeugten Gebilde verstanden, deren Komponenten in ihrem Zusammenspiel technische Funktionen ausführen und dafür mit ihrer Umgebung interagieren. Mit Gebilde sind hier geometrisch-stoffliche Systeme gemeint, nicht Prozesse oder Verfahren.

2.3.2 C&C²-Basisdefinition: Definitionen und Grundhypothesen

Unter „Basisdefinition“ sind alle Definitionen der Elemente und Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes zu verstehen. ALBERS hat 1999 die ersten Definitionen und Grundhypothesen zum C&C²-Ansatz formuliert.¹⁵⁰ 2002 haben ALBERS¹⁵¹ und MATTHIESEN¹⁵² die Forschungsergebnisse zu der Basisdefinition zusammengefasst, wobei der C&C²-Ansatz als „Elementmodell Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ bezeichnet wurde. Im Folgenden sind die **C&C²-Elemente** nach dem neusten Stand der Forschung definiert:¹⁵³

- **Wirkfläche [WF]:** Wirkflächen sind Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und/oder Informationsaustausch des technischen Systems

¹⁴⁷ Meboldt 2008: S. 78f

¹⁴⁸ Aus einer Diskussion zwischen Albers und Autor 2011

¹⁴⁹ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 83f

¹⁵⁰ Vgl. Albers et al 1999

¹⁵¹ Vgl. Albers/Matthiesen 2002

¹⁵² Vgl. Matthiesen 2002 auf S.48ff

¹⁵³ Vgl. Albers et al 2011c und Matthiesen et al 2012

beteiligt sind. Definiert werden die WF durch ihre stofflichen und geometrischen Eigenschaften.

- *Begrenzungsfläche [BF]*: Begrenzungsflächen sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die nie Wirkflächen sind.
- **Wirkflächenpaar [WFP]**: Zwei miteinander wechselwirkende Wirkflächen bilden ein Wirkflächenpaar. Sie stehen zeitweise, ganz oder teilweise in Kontakt und übertragen Energie, Stoff und/oder Information innerhalb des Systems oder zwischen dem System und der Umgebung.¹⁵⁴
- **Leitstützstruktur [LSS]**: „Leitstützstrukturen (LSS) leiten während der Funktionserfüllung zwischen genau zwei Wirkflächenpaaren Energie, Stoff und/oder Information. Eine Leitstützstruktur kann sich dabei abhängig vom Detaillierungsgrad der Modellbildung über Systeme oder Subsysteme hinweg erstrecken. Leitstützstrukturen existieren gemeinsam mit den zugehörigen Wirkflächenpaaren ausschließlich im Zeitraum der Funktionserfüllung. Leitstützstrukturen können nur in Volumina von Festkörpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen oder deren Kombination realisiert werden.“¹⁵⁵
- *Reststruktur [RS]*: Reststrukturen sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felderfüllte Räume, die nie Tragstruktur werden.
- *Tragstruktur [TS]* Tragstruktur ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen.
- **Gestaltfunktionselemente [GFE]** sind die Elemente des C&C²-Ansatzes, die sowohl durch Funktionen, wie auch Gestalt definiert sind. Dazu gehören WF bzw. WFP und LSS.¹⁵⁶

Um die Interaktion der Funktion oder des technischen Systems mit seiner Umgebung im C&C²-Modell zu erfassen, hat ALBERS das Element „Connector“ eingeführt. Der Connector ist gestaltfrei, sprich er kommt im realen System nicht vor:

¹⁵⁴ Der Begriff wurde in der Literatur schon früher definiert; z.B. durch Pahl, Rodenacker, Ersoy, Koller, Hubka und Eder (Bsp.: vgl. Rodenacker 1991 auf S. 152)

¹⁵⁵ Siehe Wiedner 2013

¹⁵⁶ Vgl. Matthiesen 2011

- **Connector [C]:** Connectoren integrieren die wirkungsrelevanten Merkmale, Eigenschaften und Wirkflächen der mit dem System interagierenden Systemumgebung. Sie liegen im betrachteten System, jedoch nicht im Gestaltungsraum und begrenzen die C&C²-Modelle technischer Systeme. Teile der Connectoren können zu Gestaltfunktionselementen werden, wenn der Betrachtungs- bzw. Gestaltungsraum vergrößert wird.¹⁵⁷
- **Funktion [FKT]:** Eine Funktion ist eine Interaktion zwischen zwei benachbarten Systemen, wobei die Größen Energie, Stoff und Information ausgetauscht werden. Sie besteht immer aus mindestens einer LSS, zwei WFP und zwei Connectoren, wobei jeder Connector eine WF enthält, die mit der WF des technischen Systems ein WFP bildet. Die Funktion wird im C&C²-Ansatz durch die Wirkungen in mindestens zwei WFP und einer LSS, sowie mindestens zweier Connectoren bestimmt (siehe Abbildung 10). Somit sind die Funktionseigenschaften direkt abhängig von den stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente, sowie der Umwelt, die durch die Connectoren repräsentiert wird. Eine Funktion findet statt und ist nichts Potenzielles, was sie von Zielen abgrenzt.¹⁵⁸

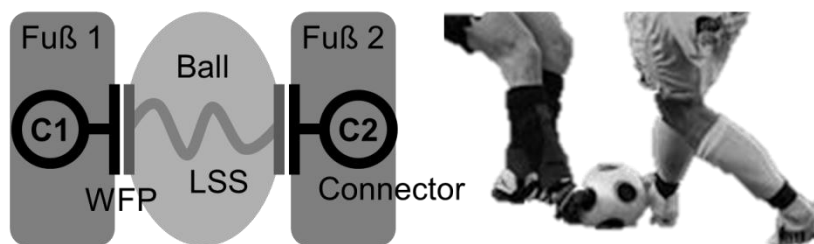


Abbildung 10: Darstellung der Funktion „Anpresskraft zwischen Füßen übertragen“ bei einem Pressball im Fußball¹⁵⁹

- **Effekt [EFK]:** Ein Effekt kann physikalischer oder chemischer Natur sein und beschreibt einen generellen, gestaltungsfreien Vorgang, wie z.B. einen Reibungseffekt. Da der Effekt gestaltungsfrei ist, kann er nicht in einem C&C²-Modell abgebildet werden.¹⁶⁰

¹⁵⁷ Vgl. Albers et al 2013

¹⁵⁸ Vgl. Alink 2010 auf S. 188f, Albers et al 2013

¹⁵⁹ Siehe: <http://www.niederl.eu/Wildon-Fruehjahr2008.htm> (Quelle Foto)

¹⁶⁰ Vgl. Albers/Matthiesen 2011, Albers et al 2013

- **Wirkung [WRK]:** Wirkung ist die technische Nutzung eines physikalischen oder chemischen Effektes in den WFP oder den LSS eines technischen Systems. Damit bestimmen die Gestalteigenschaften der WFP und der LSS die Umsetzung des Effektes und damit die Eigenschaften der Wirkung.¹⁶¹

Der umfangreiche Einsatz des C&C²-Ansatzes im industriellen Umfeld hat den Bedarf aufgezeigt, dass bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes definiert werden muss, wie der Teil des Systems, der untersucht wird, geometrisch und zeitlich abgegrenzt werden kann. Die Forschungsgruppe unter ALBERS hat sich in den letzten Jahren intensiv mit dieser Frage auseinandergesetzt.

- **Systemgrenze [SG]:** Die Systemgrenze definiert den Teil des Systems, der für die Analyse und Synthese Betrachtungsraum ist, mindestens jedoch eine Funktion. Die Systemgrenze grenzt damit den Betrachtungs- bzw. Gestaltungsraum (auch Problemlösungsraum) vom restlichen System ab. Die Systemgrenze schließt folglich alle Funktionen und Gestaltfunktionselemente ein, die notwendig sind, um das Ziel zu erreichen. Die Umgebung außerhalb des Gestaltungsraumes wird mittels Connectoren erfasst. Die Systemgrenze ist nicht statisch, sondern wird immer dem Kenntnisstand und der Zielsetzung angepasst.¹⁶²

Da die meisten technischen Systeme instationär sind, muss jedes Modell die Möglichkeit bieten das System zeitlich zu erfassen und zu beschreiben.¹⁶³ Um instationäre Systeme mit dem C&C²-Ansatz beschreiben zu können, wurden die Begriffe „Zustand“ und „Sequenz“ eingeführt.

- **Zustand [ZUS]:** Jeder Zustand wird durch die Anzahl der stattfindenden Funktionen bzw. Gestaltfunktionselemente und Connectoren beschrieben. In jedem Zustand können beliebig viele Funktionen stattfinden, mindestens jedoch eine. Ein Zustand endet, sobald eine Funktion hinzukommt, wegfällt oder sich in einem funktionsrelevanten Umfang ändert. Das Ende eines Zustandes ist gleichzeitig der Start des nachfolgenden Zustandes. Bei einer Detaillierung

¹⁶¹ Vgl. Albers/Matthiesen 2011, Albers et al 2013

¹⁶² Vgl. Dubbel 2005, Pahl/Beitz et al 2006, Ponn/Lindemann 2011 auf S.103ff, Ehrlenspiel 2007 auf S. 16, Alink 2010 auf S 189, Matthiesen et al 2012 auf S. 4f, Albers et al 2008b auf S. 3 und Albers et al 2008c

¹⁶³ Vgl. Pahl/Beitz et al 2006 auf S. 44

kann aus einem Zustand eine Sequenz mit mindestens zwei Zuständen werden.¹⁶⁴

- **Sequenz [SEQ]:** Die Abfolge von mindestens zwei Zuständen bildet eine Sequenz und ist immer gleich. Ändert sich die Reihenfolge oder ein Zustand in der Sequenz, so handelt es sich um eine neue/andere Sequenz. Bei einer Vergrößerung der Detaillierung kann aus einer Sequenz ein Zustand werden.¹⁶⁵

Funktionen, WFP, LSS und Connectoren können in mehreren Zuständen vorkommen, auch in Zuständen verschiedener Sequenzen. Zustände und damit Sequenzen können sich gegenseitig beeinflussen, so dass sich z.B. durch die Veränderung eines Zustandes oder einer Sequenz auch ein anderer Zustand oder eine andere Sequenz verändert oder nicht mehr stattfindet. Mit Hilfe der Elemente Zustand und Sequenz kann die Dynamik in instationären Systemen in einem C&C²-Modell dargestellt werden.

Die Definitionen der Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes beschreiben, wie mit Hilfe der C&C²-Elemente ein technisches System erfasst und Systemverständnis aufgebaut werden kann:¹⁶⁶

- **Grundhypothese 1 [GH1]:** „Jedes Element eines technischen Systems erfüllt seine Funktion durch Wechselwirkungen mit mindestens einem anderen Grundelement.“¹⁶⁷
- **Grundhypothese 2 [GH2]:** „Die Beschreibung einer technischen Funktion benötigt immer mindestens zwei Wirkflächenpaare (WFP) und die sie verbindenden Leit-Stütz-Strukturen (LSS) sowie zwei Connectoren (C).“¹⁶⁸
- **Grundhypothese 3 [GH3]:** „Jedes Teilsystem kann mit den Grundelementen Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS), und Connector (C) auf verschiedenen Abstraktions- und Detaillierungsstufen beschrieben werden.“

¹⁶⁴ Vgl. Albers et al 2008b, Albers et al 2008c, Vgl. Müller 1990 auf S. 59, Vgl. Ehrlenspiel 2007

¹⁶⁵ Vgl. Albers et al 2008c

¹⁶⁶ Wiedner 2013; vgl. Albers 2010; vgl. Albers et al 2011b; Albers et al 2011c; vgl. Albers et al 2013; vgl. Alink 2010 auf S. 46 und S. 188f, vgl. Matthiesen et al 2012

¹⁶⁷ Ergänzung: Jedes Grundelement eines technischen Systems kann nur Wirkungen ausüben, wenn eine Wirkfläche (WF) in Kontakt mit einer weiteren Wirkfläche steht, d. h. ein Wirkflächenpaar (WFP) bildet. Die Wirkung ist die Nutzung eines Effektes über die Gestalt des WFP.

¹⁶⁸ Ergänzung: Eine Funktion basiert auf mindestens zwei Wirkungen. Die Gestalteeigenschaften der WFP und LSS bestimmen die Wirkungseigenschaften und damit die Funktionseigenschaften.

Dazu ist eine Variation der Anzahl, Anordnung und/oder der Eigenschaften der dargestellten Grundelemente erforderlich.“

2.3.3 Anwendungswissen zum C&C²-Ansatz

Anwendungswissen wird benötigt, um den C&C²-Ansatz in Entwicklungsprojekten bzw. auf Zielsetzungen in der Produktentwicklung anwenden zu können. Bei der Anwendung werden C&C²-Modelle technischer Systeme erstellt. Allgemein kann die Modellerstellung als subjektive Realitätswahrnehmung bezeichnet werden, wobei mehrere subjektive Meinungen zu einem objektiveren Modell führen, wie es z.B. in der Gruppenarbeit der Fall ist. Der Ablauf der Modellerstellung ist nach MEBOLDT wie folgt:¹⁶⁹

- Konstruktion erfassen und interpretieren
- Auf Basis der subjektiven Wahrnehmung bildet der Modellnutzer ein mentales Modell
- Darauf baut er ein externes und explizites Modell auf, wobei er sich mit anderen Personen austauscht und weitere externe Modelle berücksichtigt

Folglich muss das Ziel sein, den Anwender oder eine Gruppe von Anwendern bei der Modellerstellung zu unterstützen. Denn erst durch C&C²-Modelle der technischen Systeme kann der C&C²-Ansatz für die Analyse und die Synthese genutzt werden. Anwendungswissen beinhaltet mögliche Vorgehensweisen, wie mit den Elementen und Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes ein C&C²-Modell erstellt werden kann. Außerdem beschreibt Anwendungswissen, welche Vorgehensweisen in welchen Situationen zielführend sein können. Im Folgenden wird das Anwendungswissen zum C&C²-Ansatz für die Analyse und Synthese technischer Systeme betrachtet. Das Anwendungswissen lässt sich nicht immer eindeutig der Analyse oder Synthese zuordnen.

Hilfestellung zur Analyse technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz

ALBERS hat mit seinem Team einen Leitfaden zur Analyse technischer Systeme entwickelt. Die vier Kernaktivitäten sind hierbei:¹⁷⁰

¹⁶⁹ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 103 (Meboldt bezieht sich in seinem Beitrag auf Stachowiak)

¹⁷⁰ Vgl. Albers et al 2008b auf S. 3f

- Definition der relevanten Teile des Systems und der dazugehörigen Systemgrenzen
- Festlegung des Ortes, der für die Funktionserfüllung des gesamten Systems von besonderer Bedeutung ist. Hierfür werden zwei mögliche Vorgehensweisen beschrieben:
 - Ausgehend von der Gestalt die WFP bestimmen und von diesen auf die Funktionen schließen, an denen diese WFP beteiligt sind
 - Ausgehend von den bekannten Funktionen bzw. Funktionsstruktur nach den Orten (WFP und LSS) suchen, an denen die Funktionen ausgeführt werden
- Anwendung eines Detaillierungsverfahrens, indem das C&C²-Modell an relevanten Orten sehr detailliert aufgebaut wird, und die Verbindungsstruktur zwischen diesen Orten mit geringer Detaillierungsstufe, wobei die Detaillierung der Betrachtung und des Modells stets den Zielen anzupassen ist
- Aufbau eines Zeit- differenzierenden Modells (Sequenzmodell), um dynamische Systemoperationen abzubilden¹⁷¹; das Sequenzmodell nützt Zustände und Sequenzen, um dynamische Systeme zu jedem Zeitpunkt beschreiben zu können

MATTHIESEN hat Schritte für die Anwendung des C&C²-Ansatzes entwickelt („Decomposition of logical states with C&C²-A“), die den fraktalen Charakter und das Sequenzmodell nützen, um das technische System zu zerlegen und in einer logischen Struktur darzustellen:¹⁷²

1. Identifizierung des relevanten WFP, das für die Erfüllung der Hauptfunktion zwingend notwendig ist¹⁷³
2. Identifizieren und Gruppieren der LSS, die notwendig sind, damit die WFP gebildet werden können¹⁷⁴

¹⁷¹ Vgl. Albers et al 2008c: Zur zeitlichen Dekomposition von technischen Systemen mit dem C&C²-Ansatz existiert noch ein detaillierter Beitrag

¹⁷² Vgl. Matthiesen et al 2012 auf S. 5f

¹⁷³ Frei übersetzt vom Autor - der einleitende Satz dazu lautet: „In order to decompose a technical system it has to be analysed for (assumed) important points. Important points are WSPs which are relevant or mandatory for the fulfillment of the main function ...”

3. Festlegung verschiedener logischer Zustände der LSS-Gruppen¹⁷⁵
4. Aufbau einer logischen Struktur, die alle Korrelationen und Abhängigkeiten zwischen den LSS-Gruppen wiedergibt¹⁷⁶

Hilfestellung zur Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz

MATTHIESEN¹⁷⁷ bezieht sich dabei auf die VDI 2223¹⁷⁸ und zeigt auf, wie mit Hilfe des C&C²-Ansatzes eine Antriebswelle entwickelt werden kann, zu der die Schnittstellen (wie z.B. Lagerung, Position des Zahnrades, ...) bekannt sind. Er leitet mittels der Kraftflussregel die notwendigen orthogonalen und parallelen Wirkflächen ab, woraus wiederum die Gestalt der Wirkfläche abgeleitet werden kann. Dazu wird die zu gestaltende Wirkfläche zunächst stark abstrakt als Fläche ohne Gestalteigenschaften dargestellt, um aus diesen Flächen später die Gestalt zu definieren.

ALBERS¹⁷⁹ hat Regeln formuliert, um technische Probleme zu lösen. Diese Regeln sollen bei der Ideenfindung zur Problemlösung helfen, sind also als Hilfestellung zur Synthese anzusehen:

1. Füge WFP und LSS hinzu
2. Eliminiere WFP und LSS
3. Verändere die Eigenschaften der WFP (z.B. Oberflächenhärte der WF)
4. Verändere die Eigenschaften der LSS (Härtung des kraft- und informationsleitenden Teil des Bauteils)

OHMER¹⁸⁰ formuliert diese Heuristiken in seinem Beitrag zu Metaregeln für mögliche Syntheseschritte mit dem C&C²-Ansatz.

¹⁷⁴ Frei übersetzt vom Autor - der einleitende Satz dazu lautet: „CSSs have to be defined, which contribute to build a temporal existing WSP. Often more than one CSS are involved in providing a new WSP by connecting two WSs. This step needs to be executed on a high level of detail ...”

¹⁷⁵ Frei übersetzt vom Autor - der einleitende Satz dazu lautet: „Logical states of the superior CSSs, the CSS-clusters, have to be identified. For the case that a new WSP occurs the CSS fulfills other function as for the case that a WSP dissolves. Those different states of the cluster have to be determined.“

¹⁷⁶ Frei übersetzt vom Autor - der einleitende Satz dazu lautet: „For having an overview on all CSS-clusters and their different states, a logical structure must be arranged. All dependencies and correlations between the clusters have to be defined ...”

¹⁷⁷ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 120ff

¹⁷⁸ Vgl. VDI 2223

¹⁷⁹ Vgl. Albers et al 2004 und Albers et al 2004b

Ganzheitliche Hilfestellung zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz

ALBERS¹⁸¹ beschreibt die Vorgehensweise beim Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz bei der Problemlösung anhand dreier Phasen (siehe Abbildung 11).¹⁸² Kern ist hier, das technische System mit Hilfe des C&C²-Ansatzes zu abstrahieren, um eine Lösung zu finden. Die Lösung bzw. der Lösungsweg (die Synthese) wird hier mit Hilfe abstrakter C&C²-Modelle der technischen Systeme gefunden.

- Phase 1: Modellbildung
- Phase 2: Problemlösung
- Phase 3: Interpretation

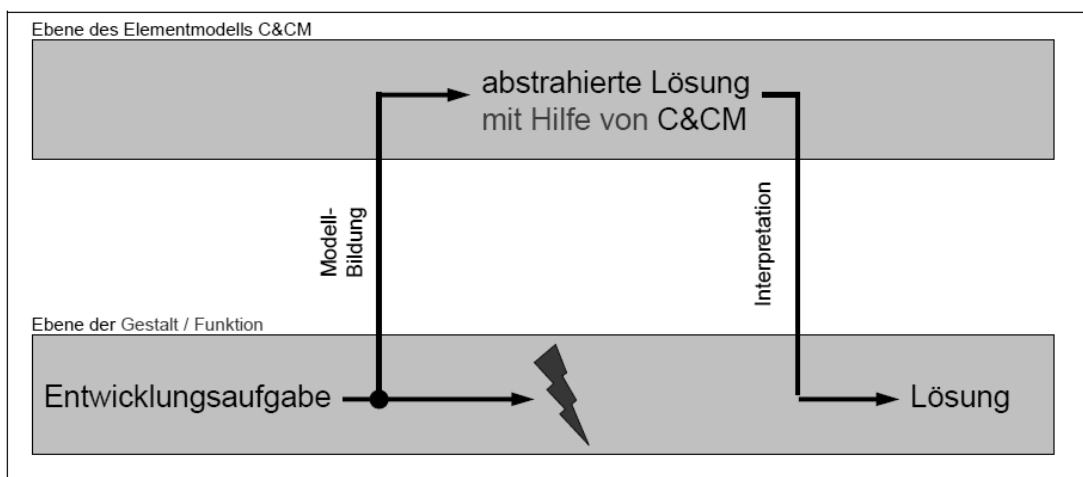


Abbildung 11: Handlungsrahmen beim Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz zur Problemlösung¹⁸³

Um den Anwender bei der Synthese mit dem C&C²-Ansatz zu unterstützen, ohne ihn durch strenge Formalismen in seinem Gedankengang einzuengen und damit seine Kreativität zu behindern, entwickelt OHMER Handlungsmuster.¹⁸⁴ Dafür formuliert er die Grundregeln der Gestaltung, die Gestaltungsprinzipien, die Gestaltungsrichtlinien und die Altschuller'schen Regeln mit dem C&C²-Ansatz.

ALINK formuliert die Aktivitäten nach ALBERS (siehe Abbildung 12) zum Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C²-Ansatz.

¹⁸⁰ Vgl. Ohmer 2008 auf S. 39ff

¹⁸¹ Vgl. Albers et al 2004

¹⁸² Vgl. Albers et al 2005 und Ohmer 2008 auf S. 52ff

¹⁸³ Ohmer 2008: S.54; vgl. Lindemann 2007

¹⁸⁴ Vgl. Ohmer 2008 auf S. 65ff

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 ⁴⁸² 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 Ereignisse finden, die zu einem früheren Zeitpunkt als der Betrieb des Systems (Funktion im Sinne von Zweck) Ursache für das Problem sein können	Bildet das System zu einem anderen Zeitpunkt WFP mit einem anderen System oder gibt es zu einem anderen 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?

Abbildung 12: Aktivitäten zur Lösung von Gestaltungsproblemen mit dem C&C²-Ansatz¹⁸⁵¹⁸⁵ Alink 2010: S. 194f

Zu jeder Aktivität sind Fragen formuliert, die helfen sollen den Anwender nicht mit „theoretischem Ballast zu überfrachten“, sondern zu einer zielgerichteten Anwendung des C&C²-Ansatzes anzuregen. Die Reihenfolge der vorgeschlagenen Aktivitäten ist beliebig veränderbar. Die Fragen zielen auf Aktivitäten zur Analyse und Synthese des technischen Systems ab. Die Art der Hilfestellung ähnelt dabei der von LEMBURG.

LEMBURG beschreibt in seinem Beitrag einen ganzheitlichen C&C²-Ansatz zur Gestaltung technischer Systeme (siehe Abbildung 13).

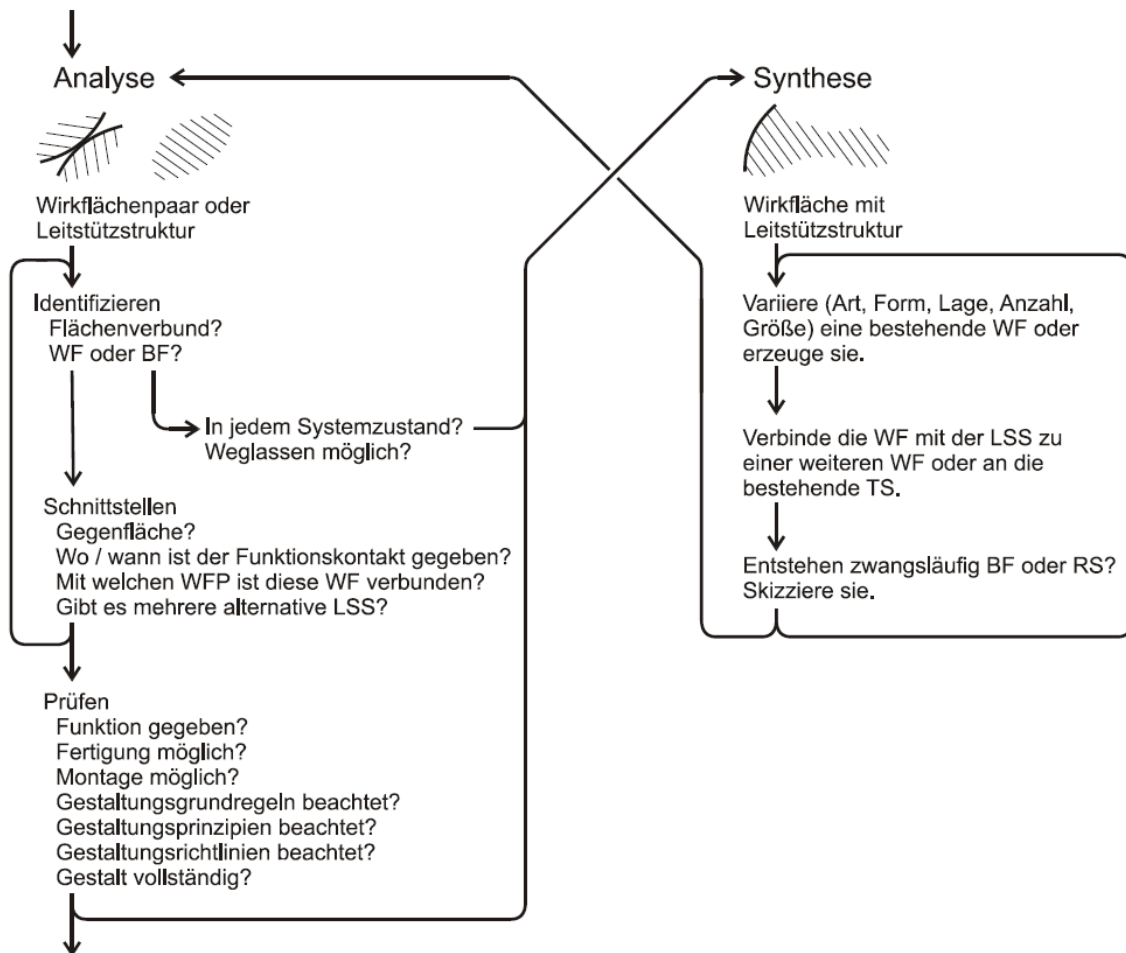


Abbildung 13: Systematische Gestaltungssynthese nach Lemburg¹⁸⁶

Den Kern des Arbeitens mit dem C&C²-Ansatz beschreibt LEMBURG als ständigen und sich mehrfach wiederholenden Wechsel zwischen Analyse und Synthese.¹⁸⁷ Dem Wechseln liegt „das gedankliche Modell der Wirkflächen und Leitstützstrukturen zugrunde ...“. Dabei werden in „der Analyse [...] Wirkflächenpaare oder die

¹⁸⁶ Lemburg 2009: S. 82

¹⁸⁷ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 139

Leitstützstruktur betrachtet, während die Synthese eine einzelne Wirkfläche mit angehängter Leitstützstruktur fokussiert. Die Variation oder Synthese von Wirkflächen wendet dabei die Mittel der Konstruktionslehre an, wie auch die Analyse sich der Gestaltungsgrundregeln und -prinzipien bedient. Dieses bedarfsspezifische, kleinschrittige Vorgehen begünstigt ein schnelles Bearbeiten der einzelnen Schritte und verhindert eine Blockade aufgrund zu komplexer Problemstellungen oder zu vieler Handlungsoptionen.“¹⁸⁸ Die Anwendung des Ansatzes wird über Leitfragen unterstützt, um die richtigen Aktionen auszulösen, wobei jede Aktion auf die C&C²-Elemente bezogen ist.

ALBERS¹⁸⁹ beschreibt eine Anwendung des C&C²-Ansatzes, bei der Produkte mit Hilfe zwei verschiedener Betrachtungsweisen entwickelt werden. Das System besteht demnach aus einer hierarchischen Struktur von Funktionen auf der einen Seite und aus einer Summe an funktionsausführenden Bauteilen auf der anderen Seite. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist, den Entwickler dabei zu unterstützen, die Anforderungen an das technische System in ein System mit Subsystemen und in eine Hauptfunktion mit Unterfunktionen einzuteilen. Den Unterfunktionen werden Effekten bzw. Wirkungen und Bauteilen zugewiesen, woraus ein Konzept im CAD für das technische System entwickelt wird:

1. Breche das System herunter in Untersysteme und Hauptkomponenten¹⁹⁰
2. Breche die Anforderungen in Funktionen und deren Start- bzw. Endpunkte herunter¹⁹¹
3. Identifiziere Elemente des technischen Systems, die an den Funktionen beteiligt sind¹⁹²

¹⁸⁸ Lemburg 2009: S. 100f

¹⁸⁹ Vgl. Albers et al 2009

¹⁹⁰ Frei übersetzt vom Autor, die ausführlichere Beschreibung lautet: „In this first stage, the overall function and the rough design space (limitative dimensions, target weight, etc.) must be defined on a very abstract level. This first “concept in mind” can be decomposed to a certain level without detailing specifications or geometric aspects”

¹⁹¹ Frei übersetzt vom Autor, die ausführlichere Beschreibung lautet: „Having identified a preliminary system decomposition, the designer must define a set of functions which together realise the demands specified in the high-level system requirements. Each of these functions must have start and end points which are localised within the emerging mechanism design.”

4. Vollende die Entwicklung des Systems, indem Simulation und Analysemethoden verwendet werden¹⁹³

Um diese Vorgehensweise zu unterstützen, wurde diese in eine Software¹⁹⁴ integriert. Darin werden die Daten des C&C²-Modells, wie in siehe Abbildung 14 dargestellt, zueinander verknüpft.

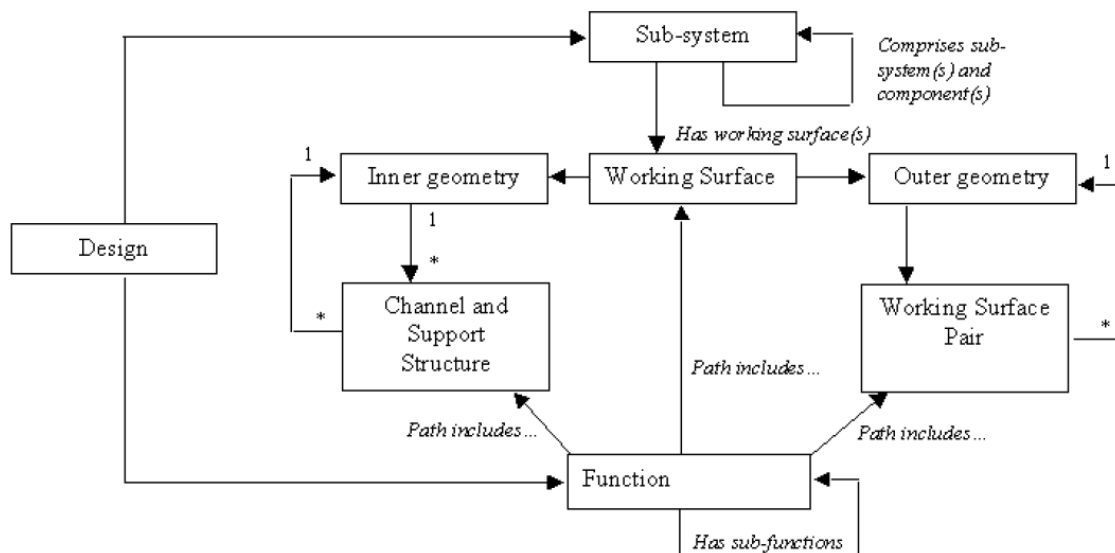


Abbildung 14: rechnerbasiertes Datenmodell¹⁹⁵ für den C&C²-Ansatz bei der Gestaltung technischer Systeme

¹⁹² Frei übersetzt vom Autor, die ausführlichere Beschreibung lautet: „Once the composition of functional interrelationships has been identified it is possible to search for machine elements and principle solutions which will carry out the functions. Since the functions have been described at a very abstract but still distinct way and also the decisive requirements are available, it is possible to look for known mechanisms with the help of catalogues ... When all the components for realizing the functions have been found, a complete C&CM modeling of the product can take place. In different levels of abstraction, the functions can be assigned within the sub systems by “mapping” them onto paths along the WSPs and CSSs.”

¹⁹³ Frei übersetzt vom Autor, die ausführlichere Beschreibung lautet: „This data developed through application of the C&CM-supported approach as outlined above delivers the input variables for subsequent stages of the design process, in which the geometric shape is fully defined (normally using a CAD system). These later stages of design use requirements which flow down from the C&CM modeling – namely information about the required properties of surfaces and structures, and definitions of sub-system boundaries alongside the nature and magnitude of interfaces ... In any design process, it is likely that iteration and redesign will be required as new information is created through detailing and testing, revealing shortcomings in earlier design decisions.”

¹⁹⁴ Albers et al 2009: S. 161 - P3 Platform: „P3 is a software tool for constructing diagrammatic linkage models capturing the elements in one or more domains and the relationships between them. It can be configured for different modeling approaches using ‘linkage meta-models’, which describe the types of element allowed in a model and the types of linkage allowed between them. This is ideal for C&CM models of the type shown in Figure 1, in which Working Surfaces can be viewed as elements and CSSs as the linkages between them”

2.3.4 C&C²-Modelle technischer Systeme

Der Zweck eines C&C²-Modells ist es, den Weiterentwicklungs- und Problemlösungsprozess zu unterstützen bzw. die Zielerreichung effizienter zu machen. Unter dem Begriff „C&C²-Modell des technischen Systems“ ist ein Modell zu verstehen, das die für die Zielerreichung relevanten Elemente des technischen Systems wiedergibt bzw. die irrelevanten Elemente weglässt.¹⁹⁶ Der C&C²-Ansatz liefert dafür die Elemente (WFP, LSS, Connectoren, etc.) und die Beschreibung (Grundhypothesen), wie die Elemente miteinander zu verknüpfen sind, um das technische System zielführend im Modell abzubilden.¹⁹⁷ Kern des C&C²-Modell ist die Verknüpfung von Funktion und Gestalt, wodurch Systemverständnis dargestellt werden kann. Daher existiert kein C&C²-Modell ohne Gestalt oder ohne Funktion.

C&C²-Modelle technischer Systeme sind grundsätzlich immer Zweck- und Personen-gebunden. Der C&C²-Ansatz bietet beliebig viele Möglichkeiten ein C&C²-Modell eines technischen Systems aufzubauen. Das C&C²-Modell wird immer von einer Person oder auch einer Personengruppe für ein definiertes Ziel, in einer bestimmten Situation aufgebaut. Damit erheben C&C²-Modelle technischer Systeme nicht den Anspruch allgemeingültig und für alle Leser des Modells eindeutig zu sein. C&C²-Modelle müssen nur für die Zielerreichung des Modellerstellers hilfreich sein.

Des Weiteren existieren keine vollständigen oder endgültige C&C²-Modelle. Da sie bei der Analyse und der Synthese benützt werden, ist die Modellerstellung erst abgeschlossen, also das C&C²-Modell ausreichend, wenn das Ziel erreicht ist. Verändern sich die Ziele oder werden neue Ziele definiert, muss in der Regel das C&C²-Modell angepasst werden. Dabei gilt, dass das Modell des technischen Systems so detailliert wie nötig, aber so grob wie möglich aufgebaut werden sollte, um nicht zielführende Mehrarbeit zu vermeiden.¹⁹⁸

Da ein C&C²-Modell den Anwender unterstützen soll, das technische System zu erfassen und das gewonnene Systemverständnis gemeinsam mit seinen

¹⁹⁵ Vgl. Albers et al 2009

¹⁹⁶ Dies ist ein elementares Prinzip von Modellen im allgemeinen, wobei C&C²-Modelle nicht nur die Reduzierung auf die relevanten Elemente, sondern auch die für die Zielerreichung notwendigen Verknüpfungen des Relevanten (relevant in Bezug auf die Zielerreichung) ermöglichen.

¹⁹⁷ Vgl. Alink 2010 auf S. 48

¹⁹⁸ Von Albers gelehrttes Prinzip in der Produktentwicklung

Teamkollegen aufzubauen, ist es zielführend stets explizite Modelle aufzubauen, sprich das Modell darzustellen. Grundsätzlich ist es aber möglich, den C&C²-Ansatz zu nutzen, um implizite Modelle aufzubauen, jedoch nur für einfache technische Systeme.¹⁹⁹

Für die Darstellung der Elemente in C&C²-Modellen wurden Symboliken²⁰⁰ entwickelt. In der Praxis sind oft sehr einfache Symboliken vorzufinden. Das liegt unter anderem daran, dass WFP und LSS meist auf Abbildungen, Skizzen oder technischen Zeichnungen des Systems eingetragen werden. Der pragmatische Ansatz ist hier, WFP durch zwei parallele Linien und LSS durch Wellen- oder Zickzacklinien einzuzeichnen.²⁰¹

Die Funktion ist in Grundhypothese 2 definiert. Trotzdem existiert ein unterschiedliches Verständnisses von Funktionen²⁰², was Probleme bei der Funktionsbeschreibung im C&C²-Modell erzeugt. Daher hat ALINK²⁰³ in seinem Beitrag das Verständnis der C&C²-Anwender für den Begriff „Funktion“ und wie sie diesen in C&C²-Modellen darstellen untersucht. Daraus entwickelt er ein Konzept zur Formulierung der Funktionen. Ziel ist es, dass die Funktionsformulierung für unterschiedliche Aktivitäten nutzbar ist:²⁰⁴

- „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.“
- „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.“
- „Funktion im Sinne des tatsächlichen Verhaltens: Es gilt derselbe Vorschlag, wie für das tatsächliche Verhalten, jedoch sollten Beschreibungen des tatsächlichen Verhaltens immer konkret sein.“

¹⁹⁹ Vgl. Miller 1956: der Mensch kann nur ca. sieben Informationseinheiten gleichzeitig verarbeiten

²⁰⁰ Vgl. Titzschkau 2005 und Reimann 2003

²⁰¹ Siehe Kapitel 5.5

²⁰² Vgl. Alink 2010 auf S. 84ff

²⁰³ Vgl. Alink 2010 auf S. 152

²⁰⁴ Alink 2010: S. 165f

- „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 benennen. Die Wirkung ist das Resultat eines Effektes bezogen auf das zu gestaltende System.“
- „Analyse und Synthese: Bei der Analyse sollte so konkret wie möglich, also gestaltbezogene Funktionen formuliert werden.“

ALINK fasst die Forschungsergebnisse von ALBERS zum Funktionsbegriff im C&C²-Ansatz wie folgt zusammen: „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 sollten ... Des Weiteren wird ... vorgeschlagen Funktion als Konzept zu betrachten, das sich aus der Bedeutung, der Darstellung und der Formulierung zusammensetzt.“²⁰⁵

MATTHIESEN²⁰⁶ beschreibt am Beispiel eines Befestigungswerkzeuges, wie der C&C²-Ansatz genutzt werden kann, um die Komplexität bei der Analyse und Synthese zu reduzieren. Dafür nützt er den fraktalen Charakter des C&C²-Ansatzes und die Möglichkeit, das technische System im C&C²-Modell zeitlich differenziert betrachten zu können.

Ein weiterer Ansatz ist, ein C&C²-Modell dafür zu nutzen, die Simulationsprozesse mit verschiedenen Simulationstools in der virtuellen Produktentwicklung zu verknüpfen. Die WFP beschreiben hierbei die Schnittstelle zwischen verschiedenen Softwaretools. Und die LSS repräsentieren die Softwaretools.²⁰⁷

ALBERS²⁰⁸ und DÜSER verwenden den C&C²-Ansatz, um ein C&C²-Modell mit einem hohen Abstraktionsgrad aufzubauen, indem sie wenig Gestaltinformation einfügen. Je weniger konkrete Gestalt des technischen Systems im Modell abgebildet ist, desto

²⁰⁵ Alink 2010: S: 198f

²⁰⁶ Vgl. Matthiesen et al 2012 auf S. 4

²⁰⁷ Vgl. Albers et al 2011c auf S. 219

²⁰⁸ Vgl. Albers et al 2010 auf S. 9

abstrakter ist es für den Anwender. Mit WFP werden Schnittstellen verschiedener Validierungswerkzeuge definiert, wobei die LSS dabei die verknüpften Validierungsmethoden, Validierungsprozesse und Validierungswerkzeuge umfassen. Die Intention, ein derartiges C&C²-Modell aufzubauen, ist, den X-in-the-Loop-Framework systemtheoretisch zu beschreiben: „Dies soll einerseits zu einem erhöhten Verständnis führen andererseits bietet diese Beschreibung die Basis zur Synthese von aufgabenspezifischen Konfigurationen des Frameworks.“²⁰⁹

2.3.5 Fazit zum Forschungsstand bezüglich des C&C²-Ansatzes

Am Anfang des Beitrages wurde dargestellt, dass eine hohe Anzahl an Produktentwicklungen auf bestehenden Produkten aufbauen und daher keine Radikalinnovationen notwendig sind, sondern inkrementelle Innovationen. Inkrementelle Innovationen sind nicht als mindere Innovationsleistung zu sehen. Im Gegenteil kann es als sehr herausfordernd bezeichnet werden, zu bestehenden, meist sehr ausgereiften Systemen ein ausreichendes Systemverständnis aufzubauen, um das Produkt zielgerecht²¹⁰ verändern und damit verbessern zu können.

Für den Entwickler sind Modelle ein sehr wichtiges Hilfsmittel beim Systemverständnisaufbau. Der Mensch nutzt Modelle, um seine Umgebung zu erfassen bzw. sich Verständnis über technische Systeme anzueignen. Der C&C²-Ansatz eignet sich besonders, um Modelle technischer Systeme aufzubauen. Diese C&C²-Modelle technischer Systeme ermöglichen über die Elemente WFP und LSS die Darstellung von Systemverständnis, indem Funktion und Gestalt in diesen Elementen verknüpft werden. Die Grundhypothesen des C&C²-Ansatzes definieren, wie Funktionen und Wechselwirkungen im C&C²-Modell beschreiben werden können.

An dieser Stelle wird eine mögliche Definition²¹¹ des C&C²-Ansatzes verfasst:

Der C&C²-Ansatz ermöglicht den Aufbau von Modellen technischer Systeme, mit dem Ziel den Anwender im Moment der Analyse und der Synthese in der Produktentwicklung zu unterstützen,

²⁰⁹ Düser 2010: S. 78f

²¹⁰ Im Sinne von: den Kunden- bzw. Marktanforderungen entsprechend

²¹¹ Definition des C&C²-Ansatzes nach Gesprächen mit Matthiesen in den Jahren 2007 - 2010

indem abstrakte Funktionen mit konkreter Gestalt über Gestaltfunktionselemente verknüpft werden.

Durch diese Verknüpfung kann Systemverständnis aufgebaut, dargestellt und im Team diskutiert werden, wodurch C&C²-Modelle technischer Systeme intersubjektiv²¹² sind.

C&C²-Modelle sind personengebunden und werden wider Vollständigkeit²¹³, zielorientiert und unabhängig vom Komplexitäts- und Detaillierungsgrad auf immer die gleiche Art und Weise erstellt.

Wie dargestellt, gibt es zum C&C²-Ansatz, seinen Elementen und Grundhypothesen eine Reihe von Beiträgen. Es wurde untersucht, wie der C&C²-Ansatz im Produktentwicklungsprozess eingebunden werden kann und warum bzw. wie der Ansatz dem Anwender helfen kann. Im Speziellen wurde die Definition des Begriffes Funktion im C&C²-Ansatz bzw. in C&C²-Modellen intensiv erörtert. Auch existiert bereits eine Reihe von Beiträgen, um den C&C²-Ansatz mit anderen Methoden bzw. Modellen zu kombinieren, sowie Regeln, wie der C&C²-Ansatz bei Syntheseaktivitäten eingesetzt werden kann. Für die Analyse technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz existieren erste Leitfadenregeln.

Hier ist noch ein deutlicher Bedarf festzustellen. Es fehlen Untersuchungen, wie der C&C²-Ansatz bei der Analyse und Synthese technischer Systeme eingesetzt werden kann, speziell im industriellen Umfeld. Wichtig ist zu untersuchen, wie vorgegangen wird, um ein C&C²-Modell des technischen Systems zu erstellen. Wie werden Funktion und Gestalt verknüpft und somit Systemverständnis aufgebaut?

2.4 Heuristiken in der Produktentwicklung

In diesem Kapitel wird kurz dargestellt, was unter Heuristiken im Allgemeinen zu verstehen ist und wie Heuristiken in der Produktentwicklung benutzt werden können. Am Ende des Kapitels wird definiert, was unter Heuristiken in dieser Arbeit zu verstehen ist.

²¹² Vgl. Meboldt 2008 auf S. 106: „Im Kern geht es bei der Intersubjektivität um die Schnittmenge der subjektiven Erkenntnis und einer kollektiven transparenten Objektivität. Zusammenfassend ist die Bedingung für die Möglichkeit der Intersubjektivität die Beherrschung eines gemeinsamen Modellverständnisses.“

²¹³ Ein Modell ist nie vollständig; es ist immer Ziel, das Modell soweit aufzubauen, bis damit das Problem gelöst werden kann.

Was sind Heuristiken?

Im rationalen Modell des Menschen trifft dieser seine Entscheidungen über das Abwägen jeder möglichen Vorgehensweise. Er schätzt die Umsetzungswahrscheinlichkeit und die Ergebnisse der Vorgehensweisen ab. Unter Berücksichtigung des notwendigen Aufwandes entscheidet er sich für die beste Lösung. Es gibt Situationen, da ist es relativ leicht, alle Aspekte mit einzubeziehen. In vielen Situationen ist dies allerdings schwierig bis unmöglich. SIMON²¹⁴ kommt zu dem Ergebnis, dass die volle Rationalität aufgrund einfacher Verarbeitungsgrenzen des Gehirns sehr unrealistisch ist. Der Mensch kommt in Situationen, die neuartige Anforderungen an ihn stellen.²¹⁵ Daher wendet er den „begrenzten Rationalismus“ an. Im begrenzten Rationalismus kann der Mensch rational sein, entwickelt aber in komplexen Problemsituationen intuitive „Daumenregeln“ oder „Faustregeln“, die er zur Problemlösung anwendet. Diese Regeln, auch als „Heuristiken“ bezeichnet, dienen zur Reduzierung des Aufwandes, der notwendig ist, um ein Problem zu lösen oder allgemeiner ein Ziel zu erreichen.²¹⁶ Ein Beispiel in diesem Zusammenhang ist die Gruppe von Menschen, die einem Raubtier begegnen (siehe Abbildung 15).

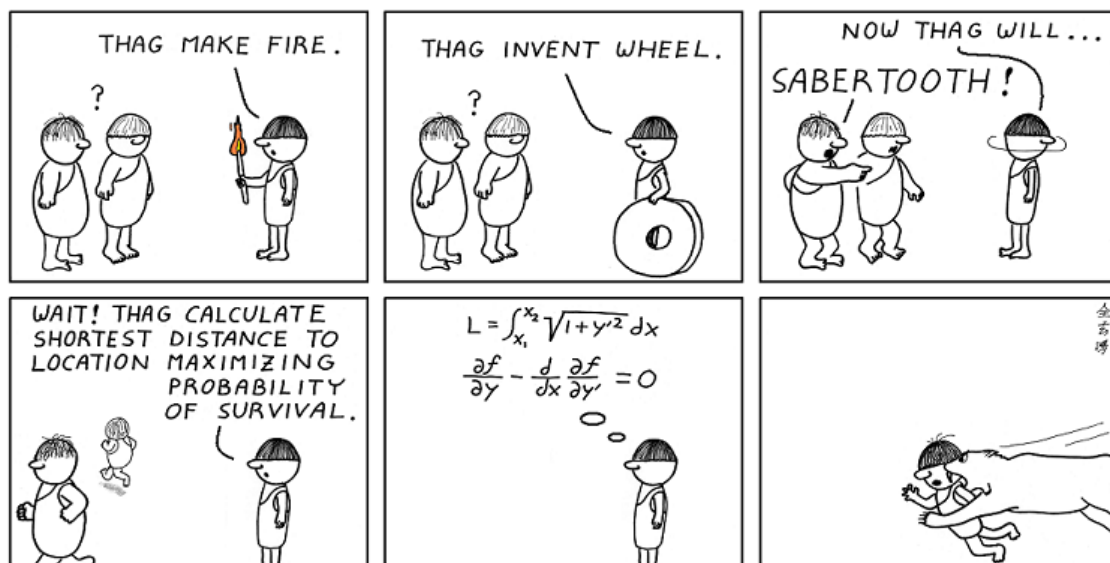


Abbildung 15: Beispiel, warum Heuristiken zielführender sein können, als eine genaue Lösungsfindung²¹⁷

²¹⁴ Vgl. Simon 1956

²¹⁵ Weth 1994: S. 73f

²¹⁶ Vgl. Bierwirth 2011

²¹⁷ Siehe <http://abstrusegoose.com/strips/30000BC.PNG>

Der Mensch, der in dieser Situation erst den optimalen Fluchtweg berechnen will, wird vom Raubtier gefressen. Dagegen scheinen die Menschen, die die Heuristik anwenden „Ergreife sofort die Flucht, wenn sich ein Raubtier nähert“ den Angriff zu überleben. Diese Situation verdeutlicht, dass eine schnellere, aber dafür ungenauere Lösungsfindung zum besseren Ergebnis führen kann.

Der Begriff „Heuristik“ stammt aus dem Griechischen „heuristikein“, was mit dem deutschen Wort „finden“ oder „entdecken“ übersetzt werden kann.²¹⁸ „Eine Heuristik ist eine Regel, die den Prozess – nicht nur das Ergebnis – einer Problemlösung beschreibt. Sie ist einfach, weil sie auf evolvierte und erlernte Fähigkeiten zugreifen kann, und sie ist intelligent, weil sie Umweltstrukturen nutzen kann.“²¹⁹ Heuristiken werden in den Situationen angewendet, in denen kein sicher zum Erfolg führender Lösungsweg bekannt ist, oder die Bestimmung des sicher erfolgreichen Lösungsweges nicht mit dem damit verbundenen Aufwand im Verhältnis steht. Heuristiken sind in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen zu finden, wie z.B. Operations Research²²⁰, Mathematik²²¹, Psychologie²²², Philosophie²²³.

Heuristiken entstehen aus intuitiven Denkweisen²²⁴ bzw. Hypothesen zur erfolgreichen Vorgehensweisen²²⁵. Dabei werden aus den validiert erfolgreichen Vorgehensweisen (eine einzelne erfolgreiche Vorgehensweise würde schon reichen) Heuristiken entwickelt und in ihrer Definition verallgemeinert. Der Grad der Verallgemeinerung bestimmt die Übertragbarkeit der Heuristiken auf andere Problemstellungen bzw. Zielsetzungen. Je allgemeiner, desto besser die Übertragbarkeit, aber desto schlechter die Anwendbarkeit und der Erfolg der Anwendung.²²⁶ Ziel ist es die Heuristiken so zu definieren, dass die Gemeinsamkeiten der Vorgehensweisen der Vergangenheit bestimmt werden (Fitting), um eine möglichst zielführende Vorgehensweise für Situationen in der Zukunft beschreiben zu können (Robustheit: je größer der Erfahrungsschatz, aus der die Heuristik entwickelt wird, umso besser in der Regel die

²¹⁸ Vgl. Duden

²¹⁹ Gigerenzer 2006: S. 3

²²⁰ Vgl. Domschke et al 2006

²²¹ Vgl. Hofmann 2002

²²² Vgl. Woike 2008

²²³ Vgl. Gigerenzer 2008

²²⁴ Vgl. Luer/Spada 1992 auf S. 236

²²⁵ Vgl. Bender 2004 auf S. 57

²²⁶ Vgl. Bierwirth 2011

Robustheit). Eine Heuristik beschreibt immer die Situation und die Vorgehensweise, in der sie angewendet werden kann.²²⁷

Heuristiken erleichtern häufig die Lösungsfindung, sind aber nicht zwingend erfolgsvoll, sie können sogar zu fehlerhaften Ergebnissen führen (bias).²²⁸ Außerdem gibt es kaum Problemlösungssituationen, für die eine vollständige Sammlung an Heuristiken existiert. Die existierenden Heuristiken haben nur eine beschränkte Aussagesicherheit.²²⁹ Daher liegt es in der Verantwortung des Anwenders, zu entscheiden, ob und wenn welche Heuristik er wählt und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu beurteilen. Studien lassen vermuten, dass sich der Anwender die Heuristiken schnell und unbewusst auf die Problemstellung bzw. Zielsetzung anpasst, um die Ergebnisse zu verbessern.²³⁰

Der Unterschied zwischen Heuristiken und Mustern in der Produktentwicklung verdeutlicht die Definition nach DEIGENDESCH: „Ein Muster ist die Beschreibung der invarianten Merkmale einer Vielzahl von Lösungen zu ähnlichen Problemstellungen in einer definierten Situation. Charakteristisch für ein Muster ist eine feste Struktur inhaltlicher Elemente und deren Verknüpfung zu über- und untergeordneten Mustern.“²³¹ Auch bei Heuristiken wird versucht, aus gemeinsamen Merkmalen der Vorgehensweisen bei Problemlösungen eine Definition zu finden, die für künftige Problemlösungssituationen hilfreich sein kann. Diese Merkmale müssen aber nicht zwingend hilfreich sein und können ggf. an die Situation angepasst werden. Die Merkmale der Heuristiken sind also nicht zwingend passend und nicht invariant. Auch die Struktur der inhaltlichen Elemente ist bei einer Heuristik lediglich ein Vorschlag und kann ebenfalls situativ angepasst werden. Heuristiken haben keine Priorisierung oder Hierarchie, sie dienen als gleichwertige Hilfestellungen zum Vorgehen, wobei der Anwender sich die für seine Situation passende Heuristik aussuchen muss. Sowohl Muster als auch Heuristiken beziehen sich auf Situationen, in denen die Anwendung helfen kann. Daher werden sowohl Muster als auch Heuristiken anhand von Beispielen erklärt.

²²⁷ Vgl. Gigerenzer 2006: S. 3

²²⁸ Vgl. Kahneman et al 1982, Luer/Spada 1992 auf S. 265, Ehrlenspiel 2007 auf S. 336

²²⁹ Vgl. Bender 2004 auf S. 57

²³⁰ Vgl. Gigerenzer 2006 auf S. 3

²³¹ Deigendesch 2009: S. 129 (siehe auch Literaturangaben bei Deigendesch 2009)

Zwischenfazit: Heuristiken entstehen aus intuitiven Denkweisen, erfolgreichen Vorgehensweisen und Erfahrung des Anwenders selber oder dritter Personen und dienen zur Zielerreichung bzw. Problemlösung. Heuristiken besitzen keine zeitliche oder inhaltliche Priorisierung und sind nicht zwingend erfolgswährend. Der Anwender muss selbst entscheiden, wann und wie er die Heuristik einsetzt, daher sollten Heuristiken möglichst konkret und dennoch allgemein anwendbar formuliert sein.

Heuristische Kompetenz und Heuristiken in der Produktentwicklung

Um Heuristiken zielführend und effektiv einsetzen zu können, bedarf es heuristischer Kompetenz. Zu dieser gehört nicht nur die Heuristiken zu kennen, sondern auch das Wissen, wie Heuristiken in Problemlösungssituationen angewendet werden können. Heuristisch kompetente Personen kennen die notwendigen Heuristiken und können diese auf ihre Problemstellung anpassen und damit anwenden.²³² Außerdem versetzen heuristische Kompetenzen „Experten in die Lage, die notwendige Organisation des Prozesses der Problemlösung selbst vorzunehmen, d.h. die notwendigen Anforderungs-, Randbedingungs-, und Zielklärungsprozesse ... zu organisieren.“²³³ Heuristische Kompetenz beinhaltet die Fähigkeit neuartige Situationen, zu denen kein oder nicht genügend Vorgehenswissen vorliegt, zu bewältigen, indem dort Heuristiken angewendet werden.²³⁴ Hierbei sollte aus einem Heuristik-Baukasten eine flexible und angepasste Vorgehensweise entwickelt werden, so dass die Problemräume zielführend reduziert werden können.²³⁵ Mit zunehmender Schwierigkeit der Problemstellung nimmt der Anspruch an die heuristische Kompetenz zu. Je höher das heuristische Erfahrungswissen ist, desto effizienter das heuristische Lösungsverfahren.²³⁶ WEISBERG kommt sogar zu dem Ergebnis, dass historisch kreative Leistungen auf bestehendem Systemverständnis und Heuristik zur Vorgehensweise beruhen.²³⁷

Zwischenfazit: Heuristische Kompetenz besteht aus dem Wissen, welche Heuristiken existieren und aus der Fähigkeit, die richtigen Heuristiken für die vorliegende Problemstellung auszusuchen, anzuwenden und dabei ggf. anzupassen.

²³² Vgl. Weth 1994 auf S. 73f

²³³ Bender 2004: S. 58

²³⁴ Vgl. Fricke 1993: S.75, Frankenberger 1997 auf S. 218 ff und Meboldt 2008 auf S. 123

²³⁵ Vgl. Pahl 1985

²³⁶ Vgl. Streim 1974: S. 160

²³⁷ Vgl. Weisberg 1999: S. 226-250

Heuristische Methoden in der Produktentwicklung

Laut VDI 2221 sind Brainstorming, Methode 66 und Methode 635 „methodisch-intuitive (heuristische)“ Vorgehensweisen, die „zum Lösen ‚schlechtstrukturierter ‘ also nicht algorithmierbarer Probleme“²³⁸ dienen. Sie sind als heuristische Methoden zu sehen, bei denen die Problemlösungssuche vereinfacht wird, indem nicht eine optimale, sondern eine sinnvolle Lösung gesucht wird.²³⁹

Die von MÜLLER entwickelte „Systematische Heuristik“²⁴⁰ ist ein Methodensystem zur Bewältigung von Problemlösungsprozessen aus den Bereichen Naturwissenschaft und Technik. Das Prinzip der Systematischen Heuristik besteht darin, wiederkehrende Problemklassen mit Methoden zu bearbeiten, die sich in der Vergangenheit als effektiv erwiesen haben. Diese Methoden werden als Programme bezeichnet und in einer Programmbibliothek zur Wiederverwendung bereitgestellt. Die Programmbibliothek besteht aus folgenden Programmklassen:

- Speicherplatz A - Präzisierung der Aufgabenstellungen
- Speicherplatz B - Entwicklung von Zeichen und Zeichensystemen
- Speicherplatz C - Entwicklung von Gesetzesaussagen
- Speicherplatz D - Entwicklung von Modellen
- Speicherplatz E – Prinzipbestimmung, sowie Bewertung/Anpassung von Entwürfen
- Speicherplatz F - Entwicklung gedanklicher Verfahren

Die Vorgehensweise zur Problemlösung wird durch das Oberprogramm der Systematischen Heuristik vorgeschrieben und für die jeweilige Aufgabe spezifiziert.²⁴¹ Das Oberprogramm beschreibt, dass ein Problem mittels folgender Arbeitsschritte gelöst werden kann:

1. Präzisierung der Aufgabenstellung
2. Aufstellung des Operationsplanes
3. Ermittlung der Verfahren zur Bewältigung des Operationsplanes

²³⁸ VDI 2221: S. 34

²³⁹ Vgl. Berger 1998 auf S. 66

²⁴⁰ Vgl. Müller 1970

²⁴¹ Vgl. Müller 2008; vgl. auch zu SPALTEN Methode in Albers et al 2011

4. Aufstellung des Arbeitsplanes
5. Ausführung des Arbeitsplanes
6. Formulierung der Ergebnisse und des Gewinns für die Methodik

RAMSTRÖM/RHENMANN haben ein Vorgehensmodell entwickelt, bei dem die Lösung von Konstruktionsproblemen auf vier Heuristiken zurück zu führen sind:²⁴²

1. „Unterteile Probleme in Unterprobleme“
2. „Benütze indirekte Evaluierungskriterien, die als Zwischenziele bei der Lösungsfindung fungieren“
3. „Plane den groben Weg der Lösungsfindung, ohne die einzelnen Aktionen zu festzulegen“
4. „Optimale Ziele durch erreichbare Ziele ersetzen, also ‘good enough’ anzustreben, auch wenn es nicht das Optimum bedeutet“

EASTMAN hat ein Vorgehensmodell zur Lösung von Entwurfsproblemen entwickelt. Es basiert auf Suchheuristiken, die in Form von Fragen oder Anweisungen formuliert sind:²⁴³ „Sind noch weitere Randbedingungen zu identifizieren?“ Dabei wird das technische System in „Design Units“ unterteilt und so lange verändert, bis das Ziel erreicht ist, sprich eine technische Lösung für die Design Units und damit das gesamte System gefunden ist.

ALINK beschreibt einen allgemeinen Vorteil von heuristischen Methoden: sie lassen „dem Bearbeiter bewusst Freiheit in der Durchführung ... Hierdurch [können] ... individuelle Erfahrungen und Vorgehensweisen in die Lösung der Probleme mit eingebracht werden.“²⁴⁴

Auch die Aktivitäten, die beim Problemlösungsprozess SPALTEN²⁴⁵ beschrieben sind, führen dazu, dass der Anwender bei der Problemlösung heuristisch vorgeht. Die SPALTEN – Schritte sind:

1. Situationsanalyse
2. Problemeingrenzung

²⁴² Frei übersetzt vom Autor - Ramström/Rhenmann 1965: S. 79

²⁴³ Frei übersetzt vom Autor - Eastman 1970: S. 31

²⁴⁴ Alink 2010: S. 16f

²⁴⁵ Vgl. Albers et al 2011 auf S.21ff

3. Alternative Lösungssuche
4. Lösungsauswahl
5. Tragweitenanalyse
6. Entscheiden und Umsetzen
7. Nachbereiten und Lernen

Zwischenfazit: In der Produktentwicklung werden Heuristiken als Hilfestellung bei der Problemlösung bzw. in der Entwicklung neuer Produkte gesehen. Jede Heuristik sollte mit Beispielen und Situationsbeschreibungen formuliert sein, so dass sie bei ähnlichen Problemstellungen angewendet werden können.

Beispiel für eine Heuristik in der Produktentwicklung

Wenn eine längere, unüberschaubare Handlungssequenz geplant wird, sollte das Problem in überschaubare Teile zerlegt werden. So kann ein Teil nach dem anderen gelöst werden, um zur Lösung des gesamten Problem zu kommen.²⁴⁶

Heuristiken als geeignetes Hilfsmittel, um den C&C²-Ansatz anzuwenden

Für die Produktentwicklung und Problemlösung sind Modelle hilfreich, für die heuristisches Anwendungswissen zur Verfügung steht. Heuristiken für den C&C²-Ansatz würden nicht zwangsweise zu zielführenden C&C²-Modellen des technischen Systems führen. Aber sie könnten helfen, den C&C²-Ansatz zielstrebig und effektiver anzuwenden, indem sie dem Anwender eine Hilfestellung bieten würden, um C&C²-Modelle zu erstellen.²⁴⁷

Definition: Heuristiken zum C&C²-Ansatz

C&C²-Heuristiken sind aus erfolgreichen Vorgehensweisen abgeleitete Hilfestellungen, die beschreiben, wie und wann der C&C²-Ansatz in Problemlösungs- und Entwicklungsprojekten angewendet werden kann. Sie beschreiben bewährte Vorgehensweisen, um ein technisches System mit dem C&C²-Ansatz zu analysieren (und daraus Syntheseschritte abzuleiten), um das gewonnene Systemverständnis in C&C²-Modellen darzustellen. Die C&C²-Heuristiken sind nicht obligatorisch anzuwenden und besitzen keine Priorisierung oder eine feste Reihenfolge. Beispiele

²⁴⁶ Vgl. Weth 1994 auf S. 73

²⁴⁷ Vgl. Alink 2010 auf S. 14f

aus dem industriellen Umfeld helfen dem Anwender die Heuristiken auf seine Situation bzw. Zielsetzung anpassen und somit heuristische Kompetenzen zu vermitteln.

3 Zielsetzung der Arbeit

Im Bereich der Entwicklungsmethodik existiert eine große Anzahl an verschiedenen Modellen, die helfen den Produktentwicklungsprozess zu verbessern, bzw. die Entwickler zu unterstützen. MEBOLDT kommt zu folgendem Fazit: „Die Produktentstehung hat sich bis heute stärker auf die Beschreibung von Modellen konzentriert als auf den Schritt der Modellbildung.“²⁴⁸ Und obwohl der C&C²-Ansatz von ALBERS von Anfang an sehr pragmatisch ausgerichtet und auch in den Vorlesungen anhand von Beispielen aus der Praxis vermittelt wird, lag der bisherige Schwerpunkt der Beiträge zum C&C²-Ansatz auf der Beschreibung und Definition der Elemente, Grundhypothesen, sprich der **Basisdefinition** des Modells (siehe oberer Kasten im mittleren Feld in Abbildung 16). Auch die Eingliederung des Ansatzes in den Produktentwicklungsprozess und die Kombination des C&C²-Ansatzes mit anderen Modellen und Methoden wurde untersucht. Bei der Forschung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes, also der **Modellerstellung** (siehe mittlerer Kasten im unteren Feld der Abbildung 16) in der Analyse und Synthese technischer Systeme, ist trotz erster Beiträge noch ein deutlicher Bedarf festzustellen. MATTHIESEN merkt hierzu an: „So ist nach Erfahrungen des Autors²⁴⁹ der Contact&Channel-Approach ein sehr einfacher Ansatz, die Bildung eines Contact&Channel-Modells im Gegensatz dazu aber nicht leicht.“²⁵⁰ Auch ALBERS²⁵¹ weist darauf hin, dass die Anwendung des C&C²-Ansatzes in Problemlösungsprozessen noch weiter untersucht werden muss, um den Anwendern eine ausreichende Hilfestellung für die Anwendung des C&C²-Ansatzes anbieten zu können. Der Autor wendet während seiner fünfjährigen Tätigkeit als Entwicklungsingenieur und technischer Projektleiter in einem Industrieunternehmen den C&C²-Ansatz in einer Vielzahl an Projekten an.²⁵² Die Untersuchungen mit 62 Anwendern des C&C²-Ansatzes zeigen, dass der Ansatz anhand der Definitionen und Grundhypothesen sehr gut zu verstehen und anderen Personen gut zu vermitteln ist. Gleichzeitig kann in den Projekten Bedarf für eine Hilfestellung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes festgestellt werden.

²⁴⁸ Meboldt 2008: S. 106

²⁴⁹ Matthiesen war 7 Jahre als Entwickler und Entwicklungsleiter in der Industrie tätig.

²⁵⁰ Matthiesen 2011: S. 9

²⁵¹ Vgl. Albers et al 2007

²⁵² Siehe Kapitel 4

Zwischenfazit: Der C&C²-Ansatz ist einfach zu verstehen, aber die Anwendung gestaltet sich schwierig, da Hilfestellungen zur Anwendung fehlen, speziell bei der Analyse und Synthese technischer Systeme.

Diese Arbeit hat zum Ziel Anwendungswissen für den C&C²-Ansatzes bei der Analyse (und Synthese²⁵³) technischer Systeme zu entwickeln. Dazu wird der der C&C²-Ansatz in industrieller Umgebung angewendet und aus erfolgreichen Vorgehensweisen beim Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz **Anwendungswissen** abgeleitet (siehe schwarzer Kasten in Abbildung 16). Das in dieser Arbeit beschriebene Anwendungswissen soll helfen, Barrieren bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes abzubauen, so dass der C&C²-Ansatz effizienter bei Problemstellungen und Zielsetzungen in der Produktentwicklung angewendet werden kann.

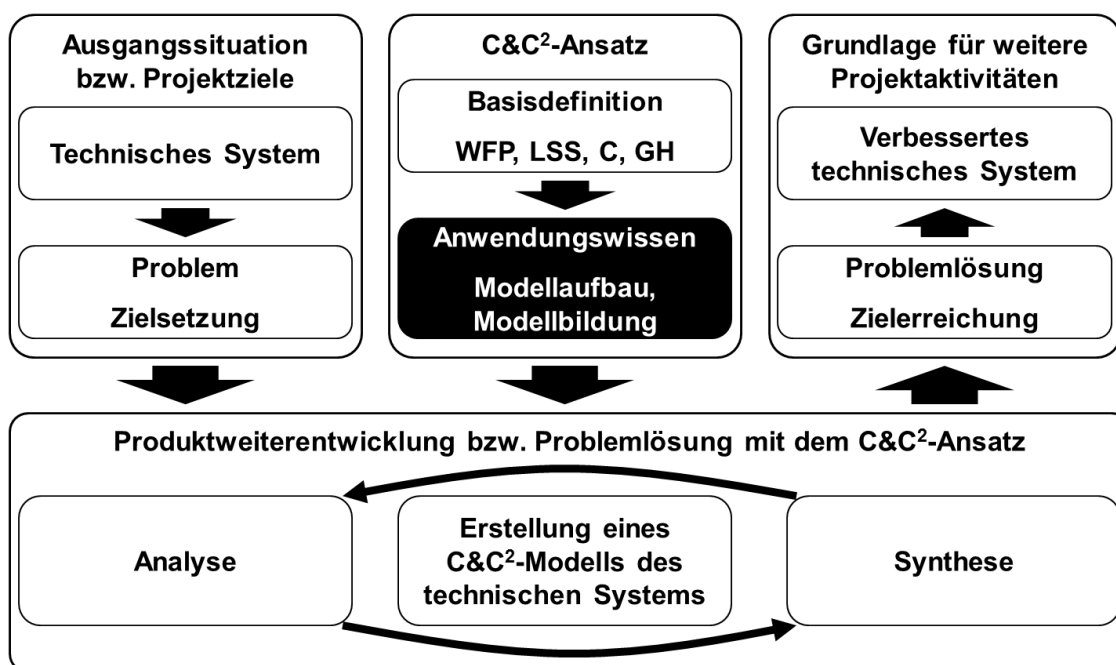


Abbildung 16: Ziel dieser Arbeit ist Anwendungswissen für den C&C²-Ansatz zu erarbeiten (Beschreibung: Vergleiche Kapitel 2.3 bzw. Abbildung 9)

Das Anwendungswissen beschreibt, wie zu technischen Systemen C&C²-Modelle erstellt werden können und ist in zwei Felder unterteilt: das Wissen zum Modellaufbau beschreibt, wie mit Hilfe der Modellelemente und Grundhypothesen ein C&C²-Modell des technischen Systems aufgebaut werden kann. Hier ist z.B. festgehalten, welche

²⁵³ Die Arbeit beschäftigt sich nicht explizit mit der Synthese, jedoch sind Analyse- und Syntheseschritte nicht immer eindeutig trennbar. Daher ist ein großer Anteil des Anwendungswissens dieser Arbeit auch auf die Syntheseschritte anwendbar.

Gestaltfunktionselemente in welcher Anordnung notwendig sind, um eine Funktion darzustellen. Das Wissen zur Modellbildung beschreibt, wie aus dem technischen System die Elemente (z.B. WFP, LSS, Funktionen) identifiziert und die Relationen zueinander bestimmt werden können. Der Schlüssel für einen erfolgreichen C&C²-Anwender liegt in der Fähigkeit, im technischen System die C&C²-Elemente zu erkennen: „Experten denken nicht mehr, sondern Experten sehen“²⁵⁴ mehr.²⁵⁵

Anforderungen an das Anwendungswissen

Für die Formulierung des Anwendungswissens zum C&C²-Ansatz stellt sich die Frage, wie das Wissen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes dem Anwender am besten bereitgestellt werden sollte. Es muss beachtet werden, dass „jeder Entwicklungsprozess einmalig und individuell ist.“²⁵⁶ Jede Anwendungssituation für den C&C²-Ansatz ist folglich einmalig und individuell. Fest vorgeschriebene Schritte zur Modellerstellung eignen sich eher weniger, da nicht jede Entwicklungssituation bei der Formulierung der Hilfestellung berücksichtigt werden kann. Strenge und eng gefasste Regeln können vom Anwender nicht auf seine Bedürfnisse angepasst werden. Genau dies wird oft an Methoden und Modellen kritisiert.²⁵⁷ SCHREGENBERGER²⁵⁸ spricht von der „heuristischen Schwäche“ der Konstruktionsmethodiken und meint damit die mangelnde Flexibilität (durch die starre Vorgehensbeschreibung) und den dürftigen empirischen Gehalt der Methoden. Auch BENDER²⁵⁹ kommt zu dem Fazit, dass konstruktionsmethodische Handlungsempfehlungen auf Grund ihrer starren Vorgehensbeschreibung heuristisch schwach sind und damit weder bessere Ergebnisse noch eine Reduzierung des Konstruktions- und Entwicklungsaufwandes bewirken.

Ähnlich der Hilfestellungen zum situativen Methodeneinsatz²⁶⁰ ist Ziel dieser Arbeit, dem Anwender des C&C²-Ansatzes eine situative Hilfestellung zur Verfügung zu stellen. Dem Anwender sollen keine stringenten Prozessschritte vorgegeben werden, sondern mögliche Vorgehensweisen den C&C²-Ansatz im Produktentwicklungsprozess, genauer bei der Analyse (und Synthese) technischer Systeme, anzuwenden. Um

²⁵⁴ Im Sinne „erkennen“

²⁵⁵ Mieg 2000: S. 5

²⁵⁶ Albers 2010: S. 4

²⁵⁷ Vgl. Jänsch/Birkhofer 2004

²⁵⁸ Vgl. Schregenberger 1985 auf S. 895f

²⁵⁹ Vgl. Bender 2004 auf S. 47

²⁶⁰ Vgl. Ambrosy 1996, Zanker 1999 und Ponn 2007

dieses Ziel zu erreichen, wird das Anwendungswissen in Form von Heuristiken²⁶¹ formuliert.

Ziel dieser Arbeit ist, aus empirischer Forschung im industriellen Umfeld Anwendungswissen zum C&C²-Ansatz zu entwickeln. Das Anwendungswissen wird in Heuristiken formuliert, um dem Anwender eine Hilfestellung anbieten, ohne ihm die notwendige Freiheit bei der Umsetzung zu nehmen. Dieses ist für die Anwendbarkeit des Anwendungswissens von großer Bedeutung. Die Heuristiken sollen dem Anwender helfen, den C&C²-Ansatz in Problemlösungs- und Entwicklungsprojekten anzuwenden. Die Heuristiken beschreiben, wie in der Analyse (und Synthese) technischer Systeme C&C²-Modelle aufgebaut bzw. gebildet werden können und damit das gewonnene Systemverständnis dargestellt werden kann. Die Heuristiken sollen die heuristische Kompetenz zum C&C²-Ansatz der Anwender verbessern.

²⁶¹ Siehe Kapitel 2.4

4 Forschungsmethode der Arbeit

In diesem Kapitel wird zunächst dargestellt, wie die Daten der Untersuchungen erhoben und welche Forschungsmethode angewendet wird. Am Ende werden die technischen Systeme kurz vorgestellt, anhand derer die Heuristiken erklärt werden.

4.1 Methode zur Datenerhebung

MÜLLER²⁶² kritisierte 1985 die mangelnde empirische Fundierung der Konstruktionswissenschaft. In den folgenden Jahren hat der Anteil der empirischen Studien zugenommen, um Entwicklungsmethoden und Modelle zu untersuchen.²⁶³

In dieser Arbeit werden vor allem qualitative Daten erhoben, um aus realen Produktentwicklungsprojekten die Heuristiken zu definieren. Zwar wird mit Fragebögen und Listen zur Anwendung der Heuristiken gearbeitet, diese werden jedoch vornehmlich qualitativ betrachtet. Für eine quantitative Auswertung ist die Anzahl der Projekte und der befragten Personenkreis zu klein. Um die Daten bzw. Informationen zu erheben, werden die in Abbildung 17 dargestellten Methoden verwendet.

Methode zur Erfassung der Inhalte	Ange-wendet bei	Genauere Beschreibung	Vorteile (V) / Nachteile (N) hinsichtlich der gewonnenen Informationen
Selbst-beobachtung	Projekt	Analyse des eignen Vorgehensweisen und Erkenntnissen	V: Detaillierungsgrad sehr hoch, Emotionen und Schlüsselmomente gut erfassbar / N: Objektivität kann sehr gering sein, Verallgemeinerung der Ergebnisse begrenzt möglich
Beobachtung	Projekt, DA, WS, Schulung	Analyse der Vorgehensweisen und Erkenntnissen Dritter	V: bei mehreren Probanden breite Informationsbasis, Detaillierungsgrad hoch, bewusste Beeinflussung der Probanden möglich / N: zeitintensiv, Einfluss des Beobachters unbekannt
Retrospektive Befragung bzw. Interviews	Projekt, DA, WS, Schulung	Befragung der Probanden zu bestimmten Themen	V: gezielte Fragestellung möglich, keine Störung des Entwicklungsprozesses / N: basiert auf der Wahrnehmung des Probanden, von Fragestellung abhängig
Retrospektive Dokumente	Projekt, DA, WS, Schulung	Reflexion der Projekte und Analyse von Dokumenten zum Projekt	V: keine Störung des Prozesses, Information liegt dokumentiert vor / N: Lücken, evtl. Verfälschung der Information Erstellung der Dokumente

Abbildung 17: Methoden zur Daten bzw. Informationsgewinnung in dieser Arbeit²⁶⁴

²⁶² Vgl. Müller 1985

²⁶³ Vgl. Dörner et al 1998 auf S. 7ff

Bei der Selbstbeobachtung wird die eigene Anwendung des C&C²-Ansatzes in den Projekten analysiert. Es wird nach Schlüsselmomenten bzw. -aktivitäten in der Anwendung gesucht. Der hohe Detaillierungsgrad und die Informationen über die Emotionen bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes führen zu einer hohen Anzahl detailliert beschriebener Heuristiken. Der Nachteil dieser Methode ist, dass gerade durch die Mischung von sachlichen Informationen und Emotionen eine geringe Objektivität in der Auswertung vorliegen kann. Auch die Übertragbarkeit der definierten Heuristiken auf dritte Personen kann nicht überprüft werden.

Die Beobachtung Dritter findet in Projekten, innerhalb dieser Projekte auch in Diplomarbeiten (DA), Workshops (WS) und Schulungen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes statt. Der Vorteil hierbei ist, dass durch die große Anzahl an beobachteten Personen (44 im industriellen Umfeld und 18 im universitären Umfeld) eine breite Datenbasis zur Verfügung steht. Das erleichtert die Validierung und eine allgemeingültige Definition der Heuristiken. Durch die ständige Begleitung durch den Moderator liegen die Daten bzw. Informationen sehr detailliert vor. Auch kann der Autor durch seine Rolle als Moderator die Anwendung bewusst steuern (z.B. bewusst nur gewisse Heuristiken zur Verfügung stellen). Der Nachteil ist der sehr hohe Zeitaufwand. Außerdem kann nicht erfasst werden, wie stark der Autor als Moderator die beobachteten Personen unbewusst beeinflusst. So stellt sich z.B. die Frage, ob der Erfolg der Vorgehensweise dem Moderator oder den Heuristiken zuzuschreiben ist. PONN²⁶⁵ beschreibt die teilnehmende Beobachtung eines Entwicklungsteams im Entwicklungsprozess als eine sehr geeignete Forschungsmethode und bezieht sich dabei auf WULF²⁶⁶ und GRAMAN²⁶⁷. Auch in dieser Arbeit ist die Beobachtung Dritter die wichtigste Methode um Daten für die Definition und die Validierung der Heuristiken zu erheben.

Die retrospektive Befragung findet am Ende der Projekte, Schulungen, Workshops und Diplomarbeiten statt. Von Vorteil ist hier, dass die Meinung der Probanden abgefragt werden kann, ohne den Entwicklungsprozess zu stören und gezielte Informationen abgefragt werden können. Der Nachteil hierbei ist, dass die Angaben der subjektiven Wahrnehmung der Personen entsprechen und durch den zeitlichen Abstand zwischen

²⁶⁴ DA = Diplomarbeit, WS = Workshop

²⁶⁵ Vgl. Ponn 2007 auf S. 21f

²⁶⁶ Vgl. Wulf 2002 auf S. 33ff

²⁶⁷ Vgl. Gramann 2004 auf S. 5ff

Anwendung und Befragung eine Verfälschungen der Wahrnehmung entstehen kann. Z.B. könnte eine dem C&C²-Ansatz positiv eingestellte Person die negativen Aspekte verdrängen.

Die retrospektiven Dokumente, wie z.B. ein Projektbericht oder die Diplomarbeiten zur Anwendung des C&C²-Ansatzes, bieten die Möglichkeit die Vorgehensweisen zu analysieren, ohne den Entwicklungsprozess zu stören. Der Vorteil ist, dass die Informationen dokumentiert vorliegen und eine nachträgliche Verfälschung nicht möglich ist. Der Nachteil besteht darin, dass die Informationen durch den Verfasser gefiltert und ggf. auch strukturiert werden. Dadurch gehen Details zur Vorgehensweise und damit Anwendungswissen verloren oder können sogar verfälscht werden.

4.2 Forschungsmethode

Empirische Forschungsmethoden versuchen einen Ausschnitt der Realität zu erfassen, um die Zusammenhänge zu ergründen.²⁶⁸ Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, werden dazu in dieser Arbeit qualitative Daten erhoben, die die Entwicklungsaktivitäten²⁶⁹ bzw. die Problemlösung beschreiben. Daraus werden Rückschlüsse über die entscheidenden Erfolgsfaktoren gezogen, um Anwendungswissen zum C&C²-Ansatzes zu entwickeln und diese in Form von Heuristiken²⁷⁰ zu definieren. Da der Bezug zur Realität für die Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit der Heuristiken von großer Bedeutung ist, dienen reale Produktentwicklungsprozesse im industriellen Umfeld als Basis dieser Arbeit. Die Untersuchungen finden in einem internationalen Industrieunternehmen mit ca. 22.000 Mitarbeitern statt. Das Modell wird in zwei Entwicklungsabteilungen angewendet, in denen neun bzw. 20 Mitarbeiter arbeiten. Des Weiteren sind auch Mitarbeiter aus der Fertigung, Qualitätssicherung und unternehmenseigener Forschung Teil des Projektteams. Die Personen haben alle einen technischen Hintergrund, in Form einer Ausbildung, FH Studium, Universitätsstudium oder Promotion.

²⁶⁸ Vgl. Berger 1998 auf S. 65

²⁶⁹ Vgl. Albers et al 2011 auf S. 19: „Die Aktivitäten der Produktentstehung stellen für Entwickler im Produktentstehungsprozess relevante Tätigkeiten dar.“

²⁷⁰ Siehe Kapitel 2.4: Heuristiken basieren auf der Erfahrung erfolgreicher Vorgehensweisen, daher ist ein maximaler Praxisbezug für die Definition der Heuristiken anzustreben.

Auf Grund der empirischen Forschungsmethode im industriellen Umfeld ist es nur sehr begrenzt möglich, die Rahmenbedingungen²⁷¹ zu bestimmen. Im industriellen Umfeld stehen nicht die Untersuchungen zum C&C²-Ansatz, sondern die Erreichung der wirtschaftlichen Ziele des Unternehmens im Vordergrund. Die Motivation von Seiten des Industrieunternehmens, den C&C²-Ansatz anzuwenden, liegt darin, die Effizienz der Projekte zu steigern.

Bekannt aus empirischen Studien zur Produktentwicklung im industriellen Umfeld ist, dass der Autor in den Projekten sowohl als Entwickler, als auch als Forscher fungieren muss.²⁷² Der Autor hat in den Untersuchungen zu dieser Arbeit vier verschiedene Rollen:

1. Der Autor ist das einzige Teammitglied eines Projektes (reine Selbstbeobachtung)
2. Der Autor ist Teil des Entwicklungsteams (2-6 Teammitglieder, inkl. Diplomanden und Praktikanten)
3. Der Autor ist der Leiter des Entwicklungsteams (2-4 Teammitglieder)
4. Der Autor ist nicht Teil des Entwicklungsteams, aber Moderator für die Verwendung des C&C²-Ansatzes in Projekten, Schulungen oder Workshops (bis zu 20 Teilnehmer)

Bei der Auswertung der Ergebnisse wird versucht den Einfluss des Autors auszublenden, was aber auf Grund der beschriebenen Rollen des Autors nur bis zu einem gewissen Grad möglich ist.

Basis empirischer Forschungsmethoden²⁷³ sind oft iterative Schleifen aus präskriptiven bzw. induktiven und deskriptiven bzw. deduktiven Schritten, die sich immer wieder abwechseln. In den deskriptiven bzw. deduktiven Phasen wird durch Beobachtung und Analyse Bedarf für Modelle, Methoden, Werkzeuge, etc. abgeleitet bzw. diese in der Praxis validiert. Während der präskriptiven bzw. induktiven Phasen werden die Modelle, Methoden, Werkzeuge, etc. entwickelt, um den Bedarf zu bedienen. Diese werden dann wiederum in der deskriptiven bzw. deduktiven Phase validiert bzw. Bedarf

²⁷¹ Vgl. Bender 2004 auf S.120

²⁷² Vgl. Pedgley 2007 auf S. 463

²⁷³ Vgl. Blessing et al 2009 auf S. 9ff und Schumann 2004 auf 10ff

für weitere Modelle, Methoden, Werkzeuge, etc. aufgezeigt. Daraus entsteht ein Kreislauf, innerhalb dessen immer mehr Wissen aufgebaut und validiert wird.

Auch die Forschungsmethode dieser Arbeit hat einen iterativen bzw. kreislaufartigen Charakter (siehe Abbildung 18). Aus der Analyse der Anwendung der C&C²-Basisdefinition in industrieller Umgebung wird der Bedarf für die verschiedenen Hilfestellungen zur Anwendung festgestellt. Daraufhin werden die ersten C&C²-Heuristiken situativ entwickelt, wenn der C&C²-Ansatz in einer Situation angewendet werden soll, für die kein Anwendungswissen zur Verfügung steht. Diese neuen Heuristiken werden wiederum beim nächsten Projekt, Workshop, Diplomarbeit oder Schulung zusammen mit der Basisdefinition des C&C²-Ansatz angewendet. In dieser Anwendung findet eine Validierung und Weiterentwicklung der bestehenden Heuristiken statt. Außerdem wird der Bedarf für weitere Heuristiken aufgezeigt. Auf dieser Analyse basierend werden weitere Heuristiken entwickelt, um den Bedarf zu bedienen.

Mit der Zeit werden immer mehr und besser formulierte Heuristiken definiert, so dass die Effizienz der Anwendung des C&C²-Ansatzes im Laufe der Untersuchungen steigt. Zunächst werden die Heuristiken zum Modellaufbau [HMA]²⁷⁴ und dann die Heuristiken zur Modellbildung [HMB]²⁷⁵ entwickelt.

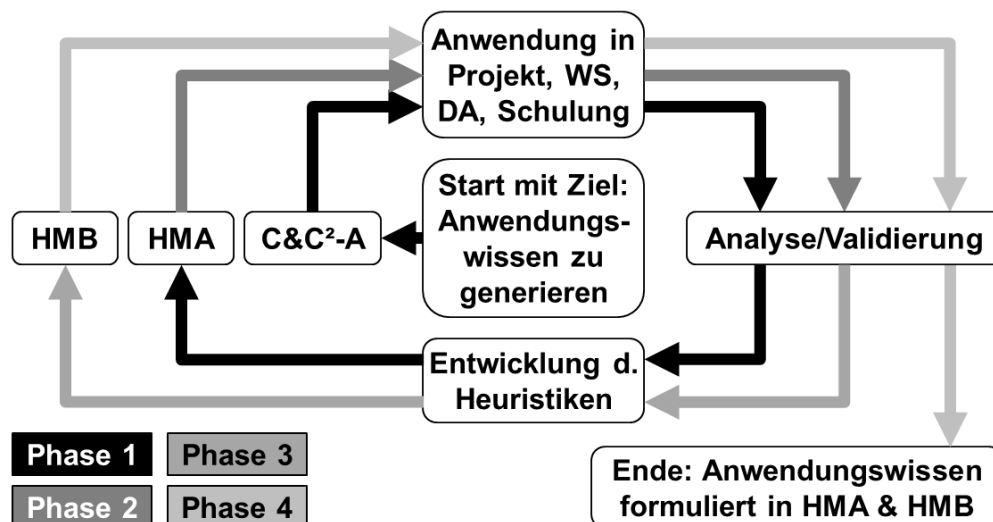


Abbildung 18: Forschungsmethode dieser Arbeit besteht aus iterativen Schleifen zwischen Anwendung, Analyse bzw. Validierung und Entwicklung der Heuristiken

²⁷⁴ Siehe Kapitel 5

²⁷⁵ Siehe Kapitel 6

Eine zeitliche Trennung zwischen deskriptiven und präskriptiven bzw. induktiven und deduktiven Schritten findet in dieser Arbeit nicht statt. Die Heuristiken werden z.T. zeitlich parallel und z.T. zeitlich versetzt entwickelt. Zum einen deswegen, weil die Heuristiken zu unterschiedlichen Zeitpunkten definiert werden (je nach Bedarf innerhalb der Projekte) und zum anderen, weil die Heuristiken parallel in den Projekten, Diplomarbeiten, Workshops und Schulungen durch unterschiedliche Personen und mit unterschiedlichen Datenerhebungsmethoden (siehe Abbildung 17) validiert werden. Dadurch liegen die Untersuchungsergebnisse zu den einzelnen Heuristiken zu verschiedenen Zeitpunkten vor. Die gewonnen Ergebnisse werden dabei stetig in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und –management²⁷⁶ am IPEK (KIT) und mit den Mitarbeitern des IKT²⁷⁷ (RWTH Aachen) diskutiert. Die Forschungszeit ist in vier Phasen eingeteilt, welche in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt sind. Wobei Abbildung 19 zeigt, wann und wie viele Untersuchungen (Projekt, Workshop, Schulung, Diplomand) durchgeführt werden.

Wie bereits im Stand der Forschung aufgezeigt, steht zu Beginn dieser Untersuchung wenig Anwendungswissen zum C&C²-Ansatz, speziell zur Analyse technischer Systeme zur Verfügung (siehe „Start“ in Abbildung 18). So wird in **Phase 1** (siehe Abbildung 19) der C&C²-Ansatz in einem Projekt angewendet, ohne dass den Anwendern Hilfestellungen zur Anwendung des Ansatzes bereitgestellt werden – es steht nur die Basisdefinition des C&C²-Ansatzes zur Verfügung. Die methodische Zielsetzung des Projektes und der Diplomarbeit²⁷⁸ in diesem Projekt ist, die Anwendung des C&C²-Ansatzes zu analysieren und erfolgreiche Vorgehensweisen zu dokumentieren. Basierend auf den Ergebnissen aus Phase 1 wird der Bedarf für Hilfestellungen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes aufgezeigt und es werden die ersten Heuristiken zum Modellaufbau (HMA) definiert und zu einem Leitfaden²⁷⁹ zusammengefasst. Die HMA beschreiben, wie ein C&C²-Modell eines technischen Systems aufgebaut werden kann. Sie sind eine Hilfestellung zur generellen Vorgehensweise mit dem C&C²-Ansatz und zur Strukturierung eines C&C²-Modells.

²⁷⁶ Siehe <http://www.ipek.kit.edu/549.php>

²⁷⁷ Siehe: <https://www.ikt.rwth-aachen.de/de/startseite.html>

²⁷⁸ Vgl. Thau 2006

²⁷⁹ Vgl. Albers et al 2008b

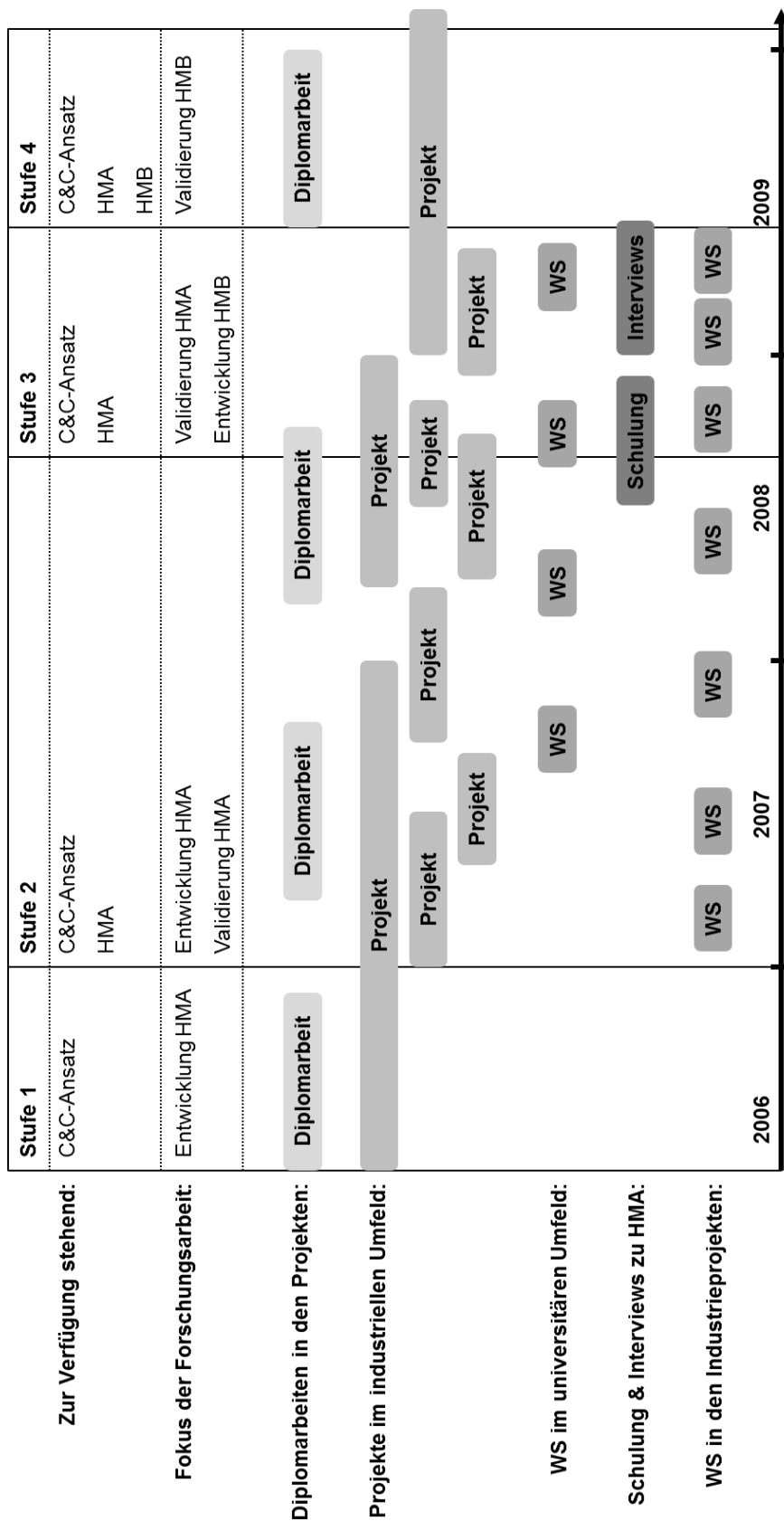


Abbildung 19: Zeitstrahl und Forschungsaktivitäten dieses Beitrages

In **Phase 2** wird der C&C²-Ansatz und die HMA in mehreren Projekten, Diplomarbeiten und Workshops angewendet. Der Fokus der Untersuchung liegt darin, die Verständlichkeit, die Lehrbarkeit und vor allem die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes mit den HMA in der industriellen Umgebung zu untersuchen, zu validieren und weiter zu entwickeln. Dafür wird am Ende von Phase 2 eine komplette Entwicklungsabteilung im C&C²-Ansatz geschult, ohne dass diese schon Vorkenntnisse zum Ansatz hat. Das Ergebnis hierbei ist, dass zusätzlich zu den HMA noch weiteres Anwendungswissen notwendig ist, um den C&C²-Ansatz bei der Analyse (und Synthese) technischer Systeme einzusetzen.

Um diesen Bedarf zu decken, werden in **Phase 3** die Heuristiken zur Modellbildung (HMB) entwickelt. Die HMB beschreiben, wie im technischen System die Elemente des C&C²-Ansatzes identifiziert und wie Funktionen definiert werden können. Sie sind eine Hilfestellung, um Funktion und Gestalt des technischen Systems im C&C²-Modell zu verknüpfen. Bei der Entwicklung der HMB kann schon auf die Erfahrungen aus Phase 1 und Phase 2 zurückgegriffen werden. In Phase 3 wird dieses Wissen in Form der Heuristiken explizit gemacht. Zum Ende von Phase 3 werden Interviews durchgeführt, um die HMA und die HMB zu validieren und weiter zu verbessern.

In **Phase 4** wird das Anwendungswissen aus der Kombination von HMA und HMB nochmals (die Validierung hat, wie beschrieben, auch stetig in der Anwendung stattgefunden) in einem Projekt und in einer Diplomarbeit validiert.

Anmerkung: Da die HMA und die HMB aus der Anwendung des C&C²-Ansatzes auf mehrheitlich mechanischen Systemen entstanden sind, stellen sie eine Hilfestellung für mechanische Funktionen dar. Die Anwendung der Heuristiken auf technische Systeme mit Fluiden und Gasen ist nicht untersucht worden.

4.3 Beispielsysteme für die Definition der Heuristiken

Folgende drei technische Systeme werden als Leitbeispiele zur Beschreibung der Heuristiken angeführt. Alle Beispiele stammen aus den Projekten während der Untersuchungen dieser Arbeit (siehe Abbildung 19). In diesem Kapitel werden die Systeme kurz beschrieben und die Zielsetzung der Projekte erläutert. So sollen die Beispiele zu den Heuristiken besser nachvollzogen werden können. Bei manchen Heuristiken sind auch Beispiele angeführt, die nicht aus den Projekten stammen und dementsprechend in diesem Kapitel nicht beschrieben werden. Hierbei handelt es sich um anschauliche Einzelbeispiele zur Erklärung der Heuristiken (z.B. Abbildung 64).

Beispielsystem 1 – Setzen einer Schraube

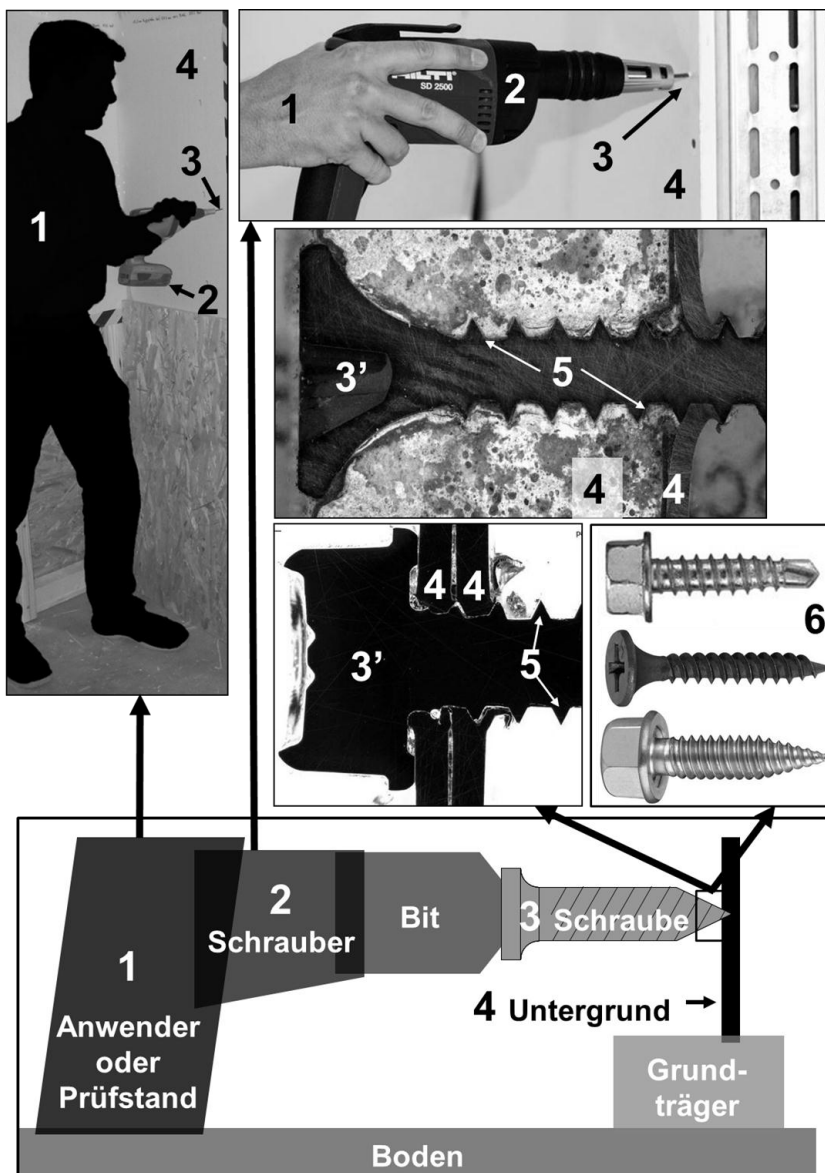


Abbildung 20: System der Schraube beim und nach dem Setzvorgang – Schraube [3] verbindet zwei Untergründe [4] – verschiedene Schraubenspitzen²⁸⁰

Ziel des Projektes: Eine Schraube zu entwickeln. Die Schraube ist ein Element, um mindestens zwei Bauteile eines technischen Systems zu verbinden. In diesem Projekt handelt es sich um Bauteile verschiedener Wandelemente eines Gebäudes. Ziel des Projektes ist, die Setzeigenschaften von Schrauben zu verbessern und das Produkt für neue Applikationen weiterzuentwickeln. Die Setzeigenschaften werden durch die

²⁸⁰ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Ausfallrate und die Zeit definiert, die die Schraube braucht, um sich in den Untergrund zu schrauben. In der neuen Applikation muss die Schraube einen mehr als drei Mal so dicken Untergrund durchdringen können. *Hauptfunktion des technischen Systems in diesem Projekt:* „Schraube schraubt sich in den Untergrund.“

Beschreibung des Systems (siehe Abbildung 20):

Die Schraube wird von einem Menschen oder einem Prüfstand [1] mittels eines Schraubers [2] in den Untergrund gesetzt. Die Bauteile des Untergrundes [4] werden zwischen dem Kopf der Schraube [3] und dem Gewinde der Schraube [5] eingeklemmt und dadurch miteinander verbunden. Es handelt sich hierbei nicht um metrische Schrauben, sondern um Schrauben, die sich ohne vorgebohrtes Loch direkt in den Untergrund setzen lassen und dabei ein Gegengewinde in den Untergrund formen. Die Herausforderung bei dieser Art Schrauben besteht darin, die Spitze [6] für den Einschraubprozess in den vorgesehen Applikationen zu optimieren.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Spitzen: Bohrspitzen (oberste Spitze der abgebildeten Schrauben in Abbildung 20) und selbstpenetrierende Spitzen (mittlere und untere Spitze der abgebildeten Schrauben in Abbildung 20). Eine Bohrschraube bohrt sich mit Hilfe einer Bohrspitze erst ein Loch in den Untergrund, um anschließend das Gewinde in den Untergrund zu formen. Eine selbstpenetrierende Spitze hingegen bildet früh einen Formschluss zwischen Gewinde und Untergrund. Wenn der Formschluss gebildet ist, kann sich die Schraube, angetrieben durch das Gewinde, in den Untergrund einschrauben und gleichzeitig dort ein Gegengewinde formen. Bei diesem Einschraubprozess wird der Untergrund nicht gebohrt, sondern verdrängt.

Um die Hauptfunktion zu optimieren, so dass sich die Schraube auf mehreren und dickeren Blechen in einer kürzeren Zeit und mit einer geringeren Ausfallrate setzen lassen, müssen eine Reihe von Funktionen an der Spitze erfüllt werden. Erschwerend kommt bei diesem Prozess hinzu, dass die WF des Untergrundes erst im Moment des Einschraubprozesses entstehen.

Beispielsystem 2 – Vereinzelung magazinierter Schrauben

Ziel des Projektes: Ein Problem zu lösen. Das Gerät (siehe Abbildung 21) wird dafür eingesetzt, Schrauben auf dem Dach eines Gebäude in einer aufrecht stehenden Position zu setzen. Da sich der Anwender zum Setzen der Schraube nicht bücken muss, bietet das Gerät im Gegensatz zu Handgeräten enorme ergonomische Vorteile und hilft gleichzeitig viel Zeit einzusparen. Des Weiteren sind die Schrauben im Gerät

magaziniert und werden für jeden Setzprozess automatisch vereinzelt und automatisch in die Einschraubposition befördert, was ebenfalls Zeit spart. Bei der Vereinzlung sind Probleme aufgetaucht. Ziel dieses Projektes ist, die Probleme zu lösen.

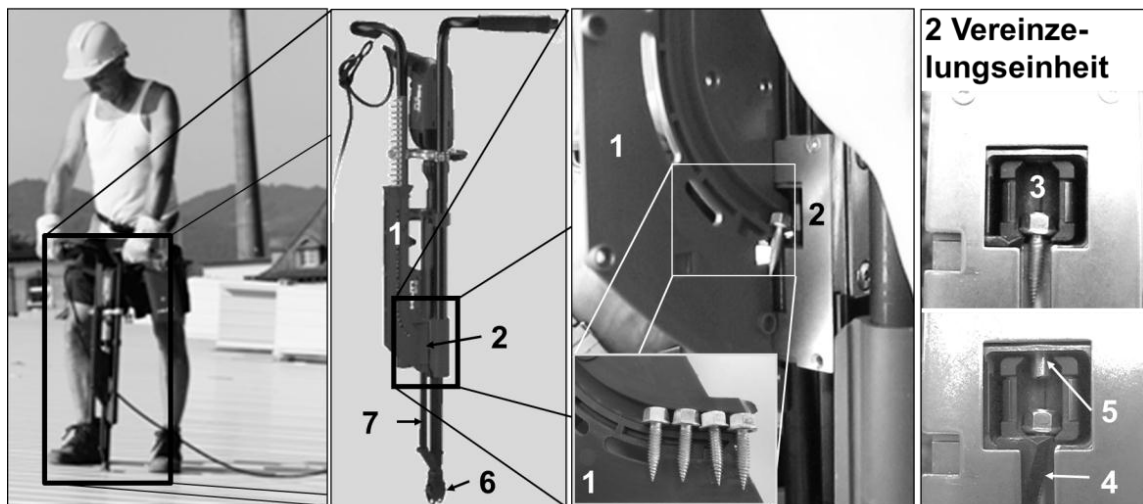


Abbildung 21: System des Standsetzgerätes beim Setzvorgang²⁸¹

Hauptfunktion des technischen Systems für dieses Projekt: „Gerät vereinzelt Schrauben während des Setzprozesses und befördert sie automatisch in die Einschraubposition.“

Beschreibung des Systems: Die Schrauben werden aneinandergereiht im Magazin [1] für die Setzungen bereitgestellt. Die Vereinzlungseinheit [2] trennt die Schrauben, um sie einzeln in die Einschraubposition vor dem Bit [6] zu führen. Die Schrauben fallen vom Magazin in einen Halter [3] innerhalb der Vereinzlungseinheit. Aus dem Halter werden die Schrauben durch einen Stab [5] ausgestoßen und fallen durch ein Transportrohr [7] vor den Bit. Im Moment des Ausstoßens der Schraube wird die Schraube im Halter der Vereinzlungseinheit durch eine Metallplatte [4] von den restlichen Schrauben separiert. Die Metallplatte wird automatisch durch den Setzvorgang mechanisch gesteuert und soll helfen, die Schrauben zu vereinzeln, so dass nur eine Schraube in den Halter fällt. Bei der Anwendung einer neuen Schraube im Geräte kommt es bei einem geringen Prozentsatz dazu, dass die Schraube kopfüber ins Transportrohr fällt. Dieses Problem gilt es zu lösen.

²⁸¹ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Beispielsystem 3 – Befestigung eines Bauteils mit einem Dübel

Ziel des Projektes: Einen Dübel zu entwickeln (siehe Abbildung 22). Ein Dübel [1] wird dafür benutzt, um mindestens ein Bauteil [2] auf einem Untergrund [3] zu befestigen. In diesem Fall handelt es sich bei dem Untergrund um Beton. Für den Kunden ist es hierbei von Vorteil, wenn der Dübel einfach zu setzen ist. Das bedeutet, dass sich der Dübel sowohl einfach in das Bohrloch einführen lässt, schnell angezogen werden kann und gleichzeitig möglichst hohe Lasten übertragen kann. Das Ziel dieses Projektes liegt darin, die Funktionen „Dübel in den Untergrund einführen“ und „Dübel befestigt das Bauteil“ zu verbessern.

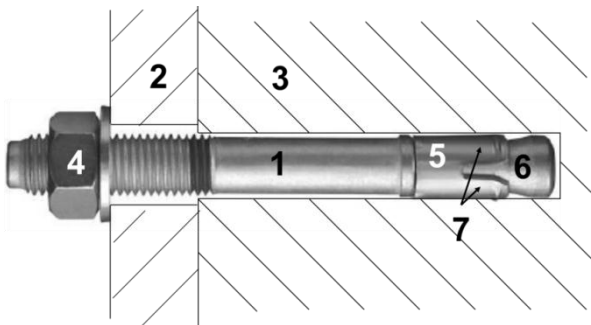


Abbildung 22: System des Dübels beim Befestigen von Bauteilen

Hauptfunktion des technischen Systems für dieses Projekt: „Dübel lässt sich leicht setzen, schnell anziehen und überträgt möglichst hohe Lasten.“

Beschreibung des Systems: Mittels eines Bohrers wird ein Bohrloch in den Beton gebohrt. Der Dübel wird in das Bohrloch eingeschlagen. Durch das Anziehen der Mutter [4] verankert sich der Dübel im Untergrund. Das zu befestigende Bauteil [2] wird zwischen Mutter und Untergrund eingeklemmt. Der Verankerungsprozess findet dadurch statt, dass die Hülse [5] des Ankers durch das Anziehen der Mutter auf den Konus [6] des Dübelgrundkörpers gezogen wird und sich dadurch die Spreizlappen [7] im Beton verankern.

5 Heuristiken für den C&C²-Modellaufbau (HMA)

In Kapitel 5 und 6 werden die Heuristiken vorgestellt, die auf Basis der Untersuchungen im industriellen Umfeld in dieser Arbeit entwickelt werden. Sie stellen das Anwendungswissen zur Analyse (und Synthese) technischer Systeme mit dem C&C²-Ansatz dar und sollen die heuristische Kompetenz der Personen verbessern, die C&C²-Modelle für Problemlösungen in der Produktentwicklung anwenden wollen.

Ziel dieses Kapitels ist es, die Heuristiken für den C&C²-Modellaufbau (siehe Abbildung 23) zu definieren. Die Heuristiken basieren auf der Anwendung des C&C²-Ansatzes in den Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld (siehe Kapitel 4). Der Modellaufbau beschreibt, woraus ein C&C²-Modell aufgebaut ist: die Struktur des Modells und wie die C&C²-Elemente (WFP, LSS, FKT, C) anzuordnen sind. Die Heuristiken zum Modellaufbau definieren bewährte Vorgehensweisen, wie ein C&C²-Modell gemäß den Definitionen und Grundhypothesen aufgebaut werden kann. Die Heuristiken sollen helfen die Elemente des C&C²-Ansatzes strukturiert zu verknüpfen und ein C&C²-Modell des technischen Systems aufzubauen. Dieses Kapitel hilft z.B. eine Funktion des technischen Systems richtig im C&C²-Modell abzubilden und den Betrachtungsraum festzulegen.

Die in Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Heuristiken sind als Hilfestellung zu verstehen, sie erheben nicht den Anspruch vollständig bzw. auf jede Problemstellung anwendbar zu sein. Es existiert kein Anwendungszwang, keine Reihenfolge oder Priorität der Heuristiken. Der Anwender kann selbst entscheiden, ob, wann und wie er diese Hilfestellung in Anspruch nimmt. Da jedes Problem und jede Aufgabenstellung einmalig ist, muss der Modellaufbau dem Ziel und den Rahmenbedingungen wie Team, Ressourcen, C&C²-Anwendungswissen, etc. angepasst werden. Um die Auswahl und die Umsetzung der Heuristiken zu unterstützen, ist zu jeder Heuristik beschrieben, in welcher Situation sie angewendet werden kann. Auch sind Beispiele angefügt, die helfen sollen die Heuristik zu verstehen und auf eigene Zielsetzungen anzuwenden.

Anmerkung: Die Abbildungen in Kapiteln 5 und 6 sind aus den Industrieprojekten entnommen und daher nicht immer einheitlich in ihrer Form und Darstellungsweise.

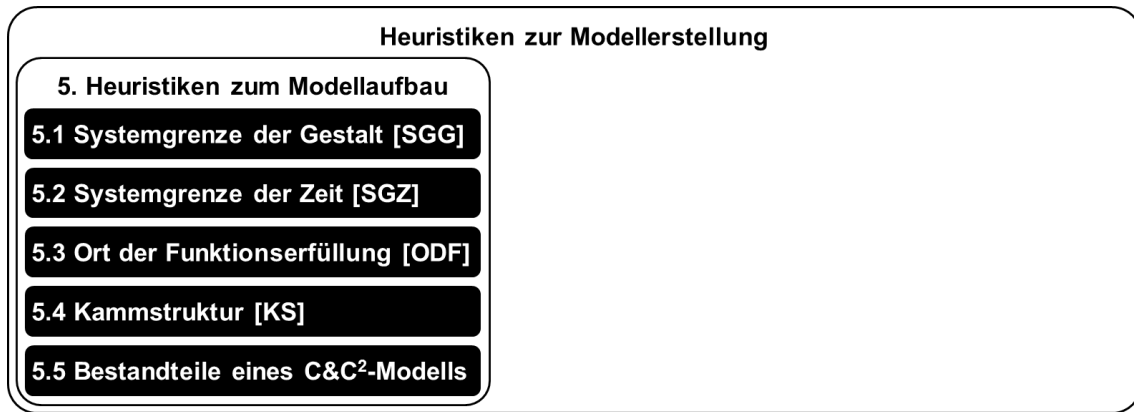


Abbildung 23: Aufbau dieses Kapitels - Heuristiken zum C&C²-Modellaufbau (HMA)

Der Aufbau dieses Kapitels ist in Abbildung 23 dargestellt. Hierbei handelt es sich um fünf Heuristiken, die sich beim C&C²-Modellaufbau als hilfreich erwiesen haben. Alle Heuristiken sind wie folgt beschrieben:

- Überschrift bzw. Name der Heuristik mit einer kurzen Beschreibung wann und wie sie angewendet werden kann²⁸²
- Elemente und Definitionen
- Wichtige Aspekte bei der Umsetzung
- Beispiele für die Umsetzung
- Merksatz zur Heuristik

5.1 Systemgrenze der Gestalt [SGG]

In diesem Kapitel beziehen sich die Aussagen zur Systemgrenze rein auf die Gestalt des technischen Systems und nicht auf die Zeit. In den Untersuchungen kann beobachtet werden, dass die meisten Entwickler bei der Betrachtung eines technischen Systems automatisch eine Systemgrenze definieren. Auch MEBOLDT beschreibt die Festlegung einer Systemgrenze als obligatorischen Vorgang bei der Betrachtung technischer Systeme: „Ein Beobachter unterscheidet immer eine Grenze, durch welche ein Raum, Zustand oder Inhalt auf der Innenseite der Grenze von einem Raum, Zustand oder Inhalt auf der Außenseite getrennt wird.“²⁸³

²⁸² Bezüge zu den Beispielen in Abschnitt 3 der Heuristik sind hierbei kursiv gedruckt.

²⁸³ Meboldt 2008: S. 100

Beim C&C²-Modellaufbau eines technischen Systems wird mit der Systemgrenze der relevante²⁸⁴ Teil bestimmt und vom restlichen System abgegrenzt. Dabei wird die Systemgrenze nicht dazu verwendet Eingangs- und Ausgangsgrößen²⁸⁵ zu vergleichen, sondern die Systemgrenze soll die relevanten Funktionen und die dazugehörigen Gestaltfunktionselemente einschließen, die dann im C&C²-Modell dargestellt werden. Eine Systemgrenze schließt mindestens eine Funktion ein, wobei die Umgebung und damit die Wechselwirkungen der Umgebung mit dem System durch die Connectoren erfasst werden können (siehe Abbildung 24). Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Connectoren als ein zentrales Element angesehen werden, um das System im C&C²-Modell abzubilden und die Entwicklungsziele erreichen zu können: „Das Herausarbeiten der in Connectoren beschriebenen Bedingungen ist eine zentrale Aktivität beim Lösen von Gestaltungsproblemen.“²⁸⁶

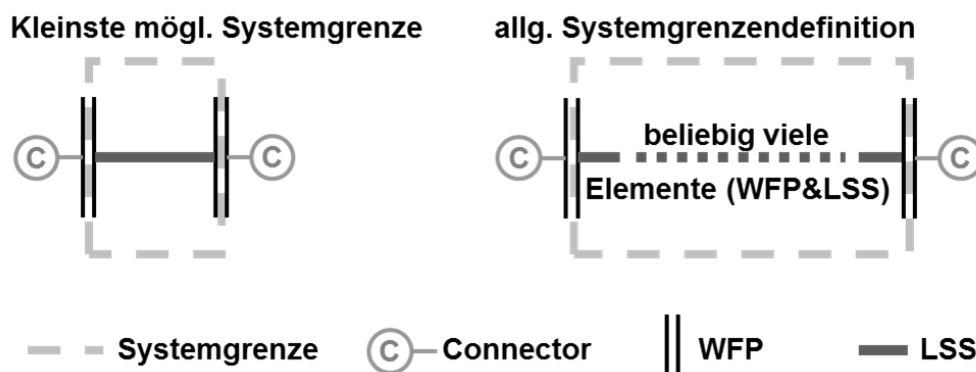


Abbildung 24: Mögliche Anordnung der C&C²-Elemente WFP, LSS, Systemgrenze (der Gestalt) und Connectoren zur Darstellung einer Funktion

Elemente und Definitionen

- **Systemgrenze (der Gestalt) [SGG]:** Die Systemgrenze dient der Trennung der für die Analyse vermutlich relevanten Elemente (und Funktionen) des Systems von der Umgebung. Anders ausgedrückt legt sie den Betrachtungsraum (und damit auch den Gestaltungsraum) im technischen System fest, der sich am Ziel der Modellbildung orientiert. Vom relevanten Teil (der Gestalt) des Systems

²⁸⁴ Relevant ist das was der Betrachter in dieser Situation als relevant einstuft. Das kann sich jederzeit durch neu gewonnene Hypothesen oder Wissen ändern.

²⁸⁵ Siehe Kapitel 2.3.1

²⁸⁶ Alink 2010: S 183 - Mit Bedingungen sind hier die relevanten Energie- und Informationsfluss in und aus dem Betrachtungsraum an der Systemgrenze gemeint bzw. die Elemente außerhalb des Systems, die die Elemente innerhalb des Systems beeinflussen.

wird ein C&C²-Modell aufgebaut. Die Systemgrenze muss mindestens eine Funktion einschließen²⁸⁷ (siehe Abbildung 24). An der Systemgrenze werden Connectoren definiert, um die Funktionen des Systems zu definieren und die Wechselwirkungen zwischen dem C&C²-Modell und seiner Umwelt zu erfassen. Wenn sich die Systemgrenze ändert, müssen die Connectoren neu definiert werden.

Wichtige Aspekte bei der Umsetzung

Da ein System immer eine Wirkung auf seine Umgebung hat und umgekehrt, muss mit Hilfe der Connectoren definiert werden, welche Wechselwirkungen zwischen Funktionen und Gestaltfunktionselementen innerhalb und außerhalb der Systemgrenze relevant sind oder bewusst als nicht relevant erachtet werden.²⁸⁸ Relevante Wechselwirkungen werden mit Connectoren abgebildet.

Die Festlegung der Systemgrenze und des Detaillierungsgrades innerhalb der Systemgrenze orientiert sich am Wissensstand bzw. der Zielsetzung des Modellerstellers.²⁸⁹ In den empirischen Studien hat sich bewährt stetig zu überprüfen, ob sich die relevanten Elemente innerhalb der Systemgrenze befinden. Grundsätzlich kann die Systemgrenze bewusst kleiner gewählt werden, um anschließend erweitert zu werden [BOTTOM→UP] (vergl. Abbildung 27 zu Abbildung 28 zu Abbildung 29) oder umgekehrt [TOP→DOWN] (vergl. Abbildung 25 zu Abbildung 26). Beim BOTTOM→UP Vorgehen können aus den Connectoren Elemente des Gestaltungsraumes (WFP und LSS) werden. Beim TOP→DOWN Vorgehen werden WFP und LSS aus dem Gestaltungsraum ausgeschlossen und werden zu Connectoren.²⁹⁰

Beide Vorgehensweisen zeigen, dass die Systemgrenze eines C&C²-Modells dynamisch ist. Sie kann wachsen, schrumpfen oder um andere Teile des Systems definiert werden, je nach Zielsetzung und Systemverständnis. Um die Übersichtlichkeit von Darstellungen eines Modells zu gewährleisten, kann folgende Faustregel herangezogen werden: Darstellungen sollten auf eine DIN A4 Seite passen. Ist dies

²⁸⁷ Grundhypothese 2 des C&C²-Ansatzes

²⁸⁸ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 43 - Die Systemgrenze symbolisiert „... eine deutliche Abgrenzung der zu betrachtenden Bestandteile gegenüber dem Ober-, Nachbar- und Untersystem [...] Dabei muss beachtet werden, dass auch Wirkungen über die Systemgrenze hinaus mit den Nachbarsystemen ausgetauscht werden. Diese Wirkungen müssen bei der Funktionsbetrachtung unbedingt berücksichtigt werden.“

²⁸⁹ Vgl. Ponn/Lindemann 2011 auf S.103ff und Ehrlenspiel 2007 auf S. 16

²⁹⁰ Vgl. Alink 2010 auf S. 144

nicht der Fall, sollte weniger vom technischen System oder das Gleiche geringer detailliert dargestellt werden.

Beispiele für die Umsetzung

Im Folgenden wird anhand des Beispielsystems 1 (Optimierung der Setzeigenschaften einer selbstpenetrierenden Schraube) die Heuristik zur Definition der Systemgrenze zur Gestalt aufgezeigt (siehe Abbildung 25). Die Schraube wird entweder durch einen Anwender oder einen Prüfstand gesetzt. Dieses Modell des technischen Systems ist wenig detailliert, um alle potentiell relevanten WFP für die Setzeigenschaften erfassen zu können. Ziel des Projektes ist die Verbesserung der Setzeigenschaften bzw. der Funktion: „Schraube schraubt sich in den Untergrund.“

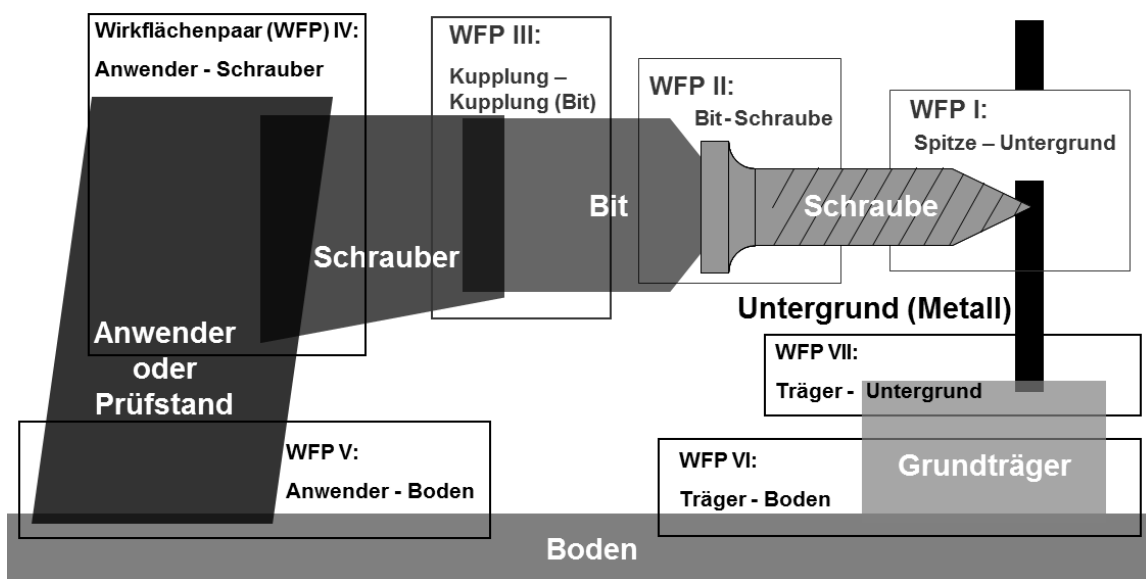


Abbildung 25: Beispielsystem 1 – Setzen einer Schraube durch einen Anwender oder Prüfstand²⁹¹

In der ersten Abschätzung wird die Schraube mit ihren WFP zum Bit und dem Untergrund durch eine Systemgrenze vom Rest des technischen Systems getrennt, da hier die relevanten Funktionen und Gestaltfunktionselemente für die Setzeigenschaften vermutet werden. Dafür wird an dieser Stelle die Detaillierung erhöht (linke Darstellung in Abbildung 26). Die relevanten Wechselwirkungen zum Rest des Systems werden mit den Connectoren erfasst. Dieses Vorgehen zeigt, wie die Analyse an einem Ort des technischen Systems mit Hilfe der Systemgrenze detailliert werden kann.

²⁹¹ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

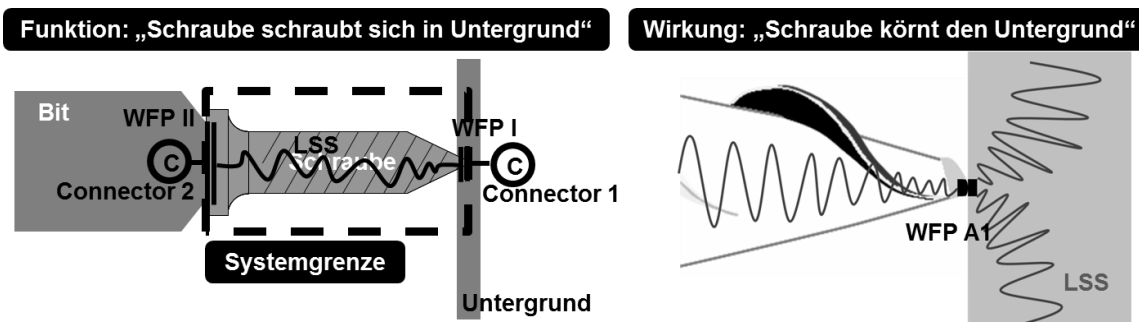


Abbildung 26: Verkleinerung der Systemgrenze zur Analyse einer Funktion und im speziellen einer Wirkung in einem WFP²⁹²

Durch die Detaillierung im WFP I können mehrere WFP und Wirkungen zwischen Schraubenspitze und Untergrund identifiziert werden. Eines ist z.B. das WFP A1, indem die Wirkung „Schraube körnt den Untergrund“ stattfindet (siehe rechte Seite in Abbildung 26). Wirkungen können in eigenen Darstellungen modelliert werden, wobei sie keine Systemgrenzen besitzen, da sie keine Funktionen und damit nur Teil eines C&C²-Modells sind.

Die Analysen in diesem Projekt zeigen, dass die Grundhypothesen helfen die Funktion und die Gestalt zu verknüpfen. So wird schnell klar, dass nicht die Schraube alleine, sondern erst die Schraube in Kombination mit dem Untergrund die Funktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“ ausführen kann. Ziel muss folglich sein, auch die WF und die LSS im Untergrund genauer zu analysieren. In diesem Fall ist die Analyse besonders herausfordernd, da die WFP zwischen Schraube und Untergrund erst während des Einschraubprozesses entstehen. Das verdeutlicht, dass Funktionen nicht von Bauteilen ausgehen können, sondern nur von der Interaktion von Elementen. Die richtige Definition der Systemgrenze ist hier entscheidend. In diesem Fall wird die Systemgrenze wieder vergrößert, um das WFP I ins Zentrum der Analyse und damit des C&C²-Modells zu rücken. So können die geometrischen und stofflichen Eigenschaften der WF und LSS von der Schraube und des Untergrundes besser erfasst werden (siehe Abbildung 27). Die Definition der Funktionen innerhalb dieser Systemgrenze, mit einer eindeutigen Zuordnung dieser Funktionen zur Gestalt im C&C²-Modell, trägt maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieses Projektes bei.

²⁹² Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

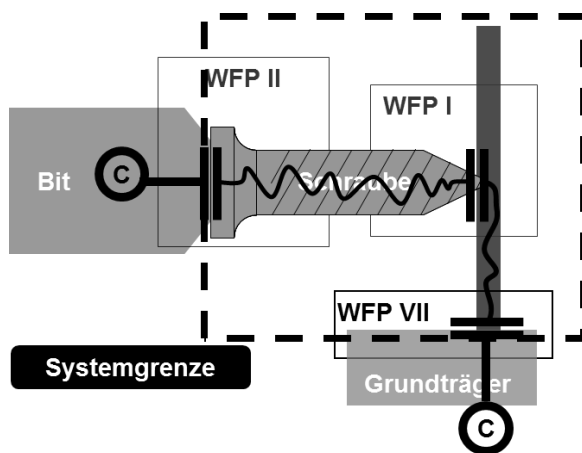


Abbildung 27: Vergrößerung der Systemgrenze für die Analyse im WFP I

Während des Projektes wird die Hypothese aufgestellt, dass auch WFP II einen Einfluss auf die Qualität des Setzprozesses der Schraube hat. Daher wird das technische System auch hier detaillierter analysiert. Dafür wird die Systemgrenze nochmals vergrößert, so dass auch die geometrischen und stofflichen Eigenschaften der WF im WFP II und der LSS in der Schraube und in dem Bit bei der Analyse berücksichtigt werden können (siehe Abbildung 28). Auf Basis dieses Modells wird untersucht, welche Funktionen bzw. Wirkungen zwischen Bit und Schraube funktionsbestimmend sind.

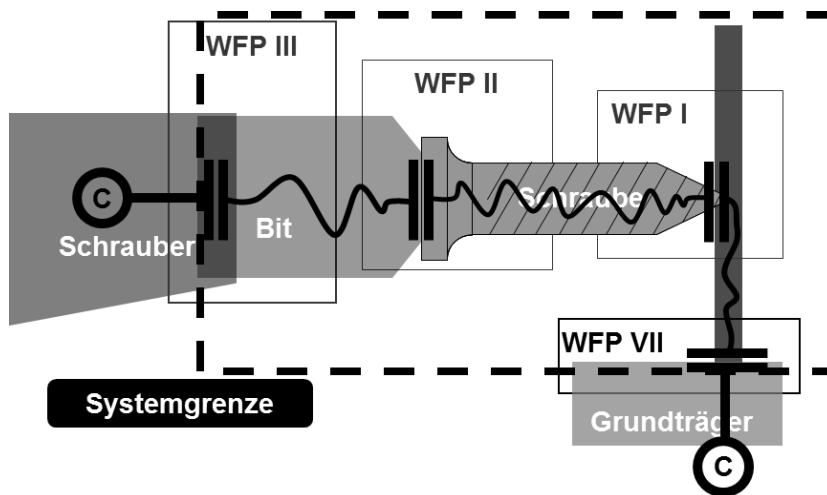


Abbildung 28: zweite Vergrößerung der Systemgrenze aufgrund einer Detaillierung in WFP II

So kann festgestellt werden, dass das WFP zwischen Bit und Schraube zu einer Unterbrechung der Übertragung des Drehmomentes führen können. Ein Fall, den jeder

Heimwerker kennt: während des Setzprozesses „springt“ der Bit²⁹³ aus dem Antrieb der Schraube und versucht vergebens wieder „einzukuppeln“. Dieses „Bitspringen“ kann unbemerkt beim Setzprozess vorkommen und führt zu schlechteren Wirkungen in WFP I, weil die Drehbewegung der Schraube unterbrochen wird. In diesem Fall beeinflusst das WFP II die Wirkungen in WFP I und damit die Funktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“.

Im Zuge dieser Analysen wird festgestellt, dass die Wechselwirkungen zwischen dem System (wie in Abbildung 28 dargestellt) und der Umgebung, abgebildet durch den linken Connector, noch nicht ausreichend erfasst sind. Elemente außerhalb der Systemgrenze beeinflussen die Wirkungen bzw. Funktionen innerhalb der Systemgrenze. Folglich wird die Systemgrenze ein drittes Mal vergrößert, um auch WFP III detaillierter zu untersuchen (siehe Abbildung 29). Auf diese Weise kann ein Springen in der Kupplung des Schraubgerätes festgestellt werden. Das Fazit ist, dass sowohl WFP I, als auch II und III die Setzeigenschaften bzw. die Funktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“ bestimmen.

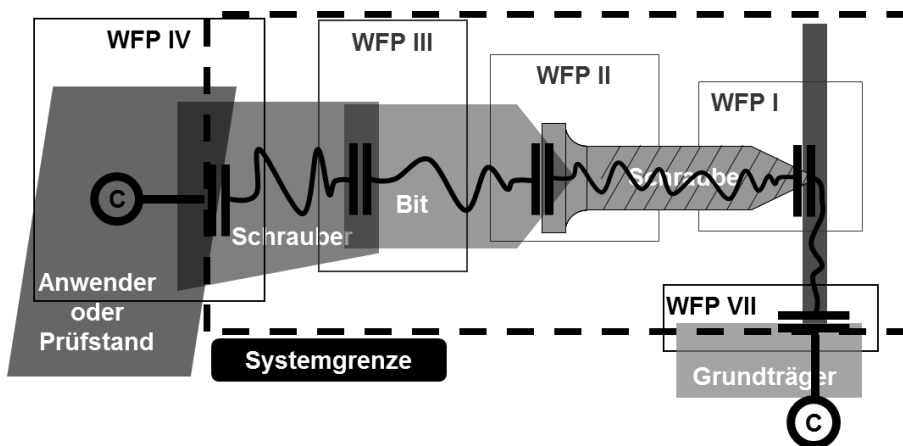


Abbildung 29: dritte Vergrößerung der Systemgrenze auf Grund einer Detaillierung in WFP III

Das Beispiel zeigt den dynamischen Charakter der Systemgrenze. Die Systemgrenze der Gestalt in einem C&C²-Modell muss immer an die Zielsetzungen und den Erkenntnisstand angepasst werden.

Anwendung dieser Heuristik in den Industrieprojekten

Das Element „Connector“ wurde erst nach diesem Projekt definiert. Aus dem Bedarf, die Wechselwirkungen zwischen dem C&C²-Modell und seiner Umgebung außerhalb

²⁹³ Umgangssprachlich oft „Kreuzschlitz“ genannt

der Systemgrenze zu erfassen, wurde daher in den Forschungsprojekten erst mit „Freischnitten“²⁹⁴ und später mit „künstlichen WFP“ gearbeitet (siehe Abbildung 30). Hier wurde die Systemgrenze durch LSS gezogen und an den Schnittpunkten künstliche WFP definiert. Sie waren Elemente, die nicht im realen System vorkommen und daher keine Gestalteeigenschaften besitzen. Künstliche WFP dienen lediglich dazu Kraft- und Informationsflüsse in und aus dem Betrachtungsraum zu erfassen. Sie sind in ihrer Definition und Verwendung den Connectoren sehr ähnlich. Die Connectoren wurden auf Basis der Erfahrungen dieser Projekte definiert. Durch diese Ähnlichkeit zwischen „künstlichen WFP“ und „Connectoren“ können die Erfahrungen beim Arbeiten mit den künstlichen WFP auf die Connectoren übertragen werden. Auf diesen Erfahrungen basiert die Definition dieser Heuristik.

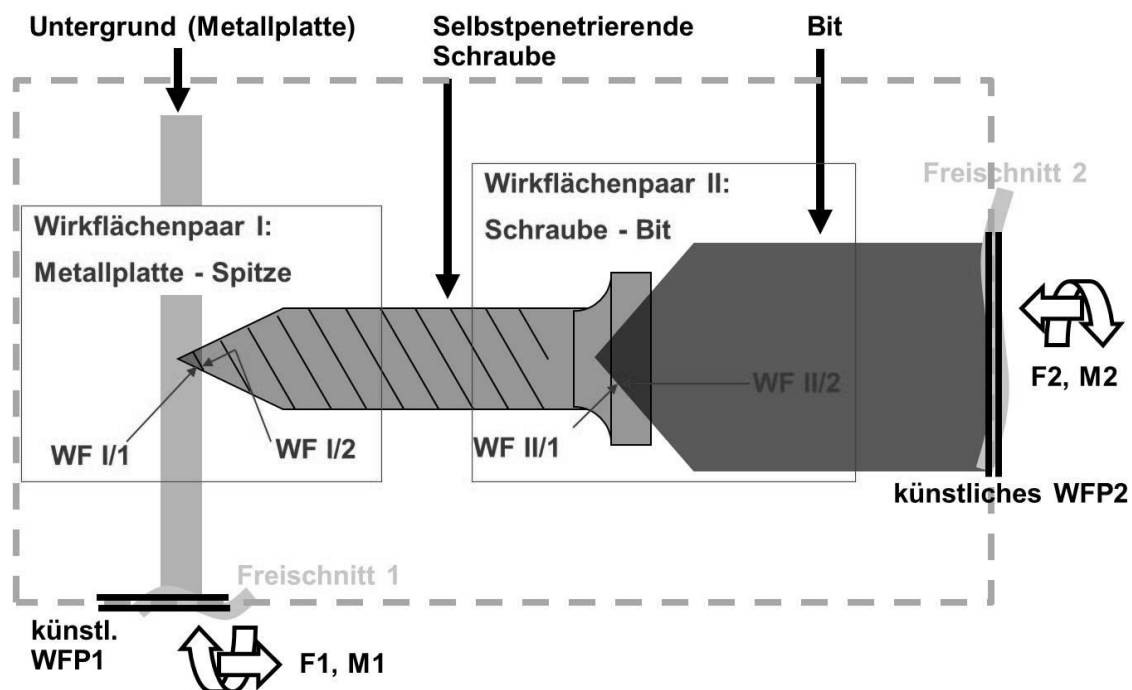


Abbildung 30: originale Darstellung des C&C²-Modells einer Schraube beim Einschraubvorgang²⁹⁵

Dennoch wäre es falsch mit künstlichen WFP zu arbeiten, da sie der Definition der WFP im C&C²-Basisdefinition widersprechen. WFP sind Elemente, die Funktion und Gestalt verknüpfen. Künstliche WFP sind im realen System nicht vorzufinden, haben keine Gestalt und können daher auch nicht Teil einer Funktion sein.

²⁹⁴ Vorgehensweise nach Matthiesen 2002

²⁹⁵ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Merksatz zur Systemgrenze der Gestalt

Zu jedem C&C²-Modell eines technischen Systems muss eine Systemgrenze der Gestalt definiert werden, die die vermutlich relevanten Elemente (Funktionen und Gestaltfunktionselemente) von den nicht relevanten Elementen des Systems trennt. Die Systemgrenze muss mindestens eine Funktion beinhalten. An der Systemgrenze werden Connectoren definiert, um die Funktionen im System und die Wechselwirkungen zwischen dem technischen System und seiner Umgebung erfassen und darstellen zu können.

5.2 Systemgrenze der Zeit: Zustand und Sequenz [SGZ]

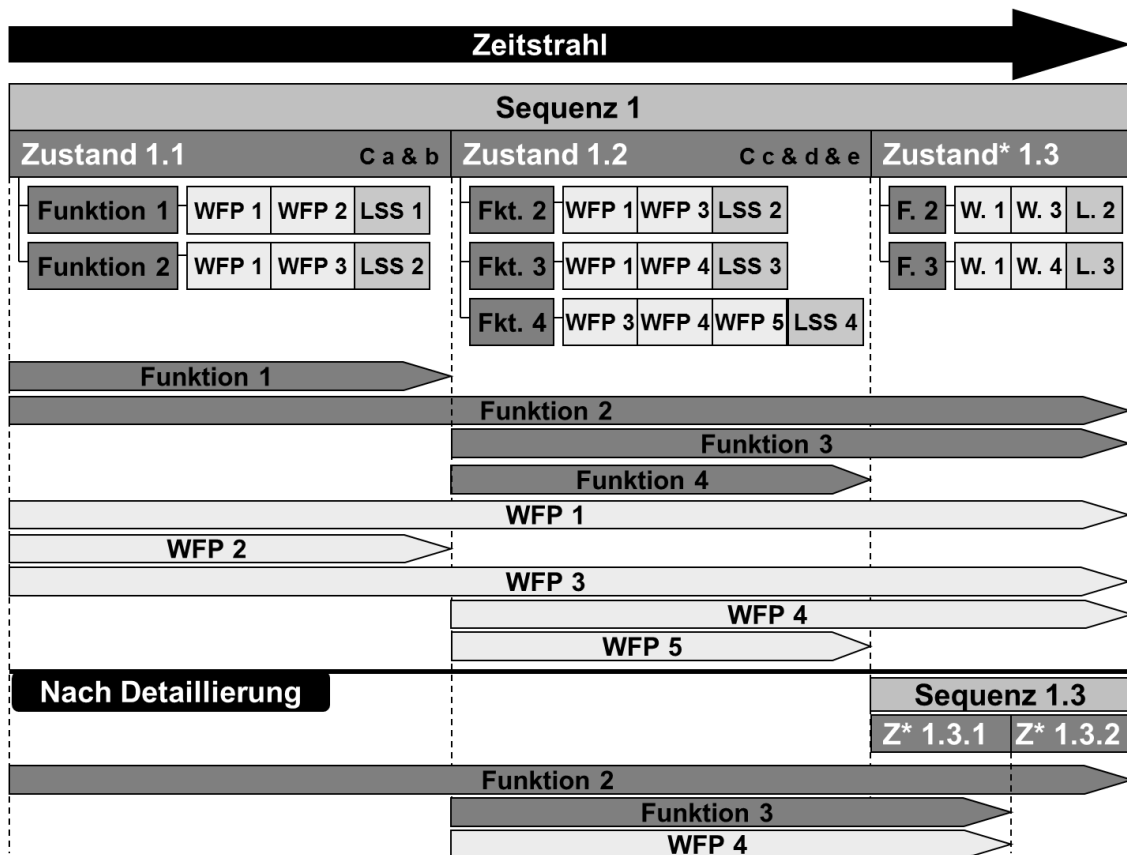
In Kapitel 5.1 wird die Systemgrenze der Gestalt für C&C²-Modelle technischer Systeme definiert. In diesem Kapitel soll die Systemgrenze der Zeit für C&C²-Modelle technischer Systeme beschrieben werden.

Instationäre technische Systeme ändern über die Zeit ihr Verhalten bzw. ihre Funktionen. Da die meisten Systeme instationär sind, muss für C&C²-Modelle neben der Systemgrenze der Gestalt auch eine Systemgrenze der Zeit definiert werden. So kann beschrieben werden, innerhalb welches Zeitabschnitts das technische System analysiert wird und wie sich Funktionen bzw. Gestaltfunktionselemente innerhalb dieses Zeitabschnittes verändern. *Bei Beispielsystem 1 ist es die Zeit zwischen erster Berührung der Schraubenspitze auf dem Untergrund und dem Moment, indem die Schraubenspitze sicher alle Untergründe durchdrungen hat.*

Die Heuristik in diesem Kapitel empfiehlt bei C&C²-Modellen instationärer Systeme Zustände und Sequenzen zu definieren. Zustände können benutzt werden, um die Zeitspanne zu beschreiben, innerhalb derer sich kein Gestaltfunktionselement und damit auch keine Funktion in einem relevanten Umfang ändert, hinzukommt oder wegfällt. Der Zustand definiert folglich eine Zeitspanne, in der das System stationär ist. Der Anfang und das Ende dieser Zeitspanne bildet die Systemgrenze der Zeit für diesen Zustand. Zu jedem Zustand ist auch immer auch eine Systemgrenze der Gestalt und Connectoren zu definieren (mehrere Zustände und Sequenzen können dieselbe Systemgrenze der Gestalt und Connectoren aufweisen). Um dynamische Systeme zu beschreiben sind mehrere Zustände notwendig. Auf diese Weise kann jedes dynamische bzw. instationäre System durch aufeinander folgende stationäre

Systeme (Zustände) beschrieben werden, indem diese zu einer Sequenz zusammengefügt werden (siehe Abbildung 34).

In Abbildung 31 sind schematische Beispiele dargestellt, die den Zusammenhang zwischen Funktionen, Gestaltfunktionselemente, Connectoren, Zuständen und Sequenzen erläutern sollen.



* C dieses Zustandes nicht dargestellt

Abbildung 31: schematische Darstellung – zeitliche Struktur eines dynamischen C&C²-Modells

Abbildung 31 verdeutlicht den Start neuer Zustände, immer wenn Funktionen hinzukommen oder wegfallen. In Zustand 1.1 wirken zwei Funktionen: 1 und 2. Zustand 1.2 beginnt, da die Funktionen 3 und 4 hinzukommen und Funktion 1 wegfällt. Zustand 1.3 beginnt, da Funktion 4 wegfällt. Wie Funktion 2 zeigt, können Funktionen über mehrere Zustände existieren. Im Beispielsystem 1 wird zwischen Zustand 1 und Zustand 2 bei der selbstpenetrierenden Schraube unterschieden, weil in Zustand 2 WFP B2 hinzukommt.

WFP können Teil mehrerer Funktionen sein und daher auch in mehreren Zuständen vorkommen, aber in unterschiedlichen Funktionen, wie z.B. WFP 1, 3 und 4 in

Abbildung 31. *Z.B existiert das WFP B2 während des gesamten Einschraubprozess der Schraube und ist Teil mehrerer Funktionen (siehe Abbildung 36). Zu jeder Funktion existiert genau eine LSS (Abbildung 31: zu Funktion 1 die LSS1, zu Funktion 2 die LSS2, und so weiter). Verändert sich die Funktion, muss auch eine neue LSS definiert werden.*

Durch eine zeitliche Detaillierung kann aus einem Zustand eine Sequenz werden, wie aus Zustand 1.3 in Abbildung 31 eine Sequenz mit den Zuständen 1.3.1 und 1.3.2 wird. Dies kann z.B. notwendig sein, um den Endpunkt von Funktion 2 und Funktion 3 zu unterscheiden. *Ein Beispiel hierfür ist der 3. Zustand in WFP II (Abbildung 38). Durch das Bitspringen wird aus dem Zustand eine Sequenz.*

Elemente und Definitionen²⁹⁶

- **Zustand:** Ein Zustand ist eine beliebig lange Zeitspanne, in der eine unveränderte Anzahl an Funktionen wirkt, mindestens jedoch eine. Die Anzahl der WFP, Connectoren und LSS in einem Zustand ist konstant, da auch die Anzahl der Funktionen konstant ist. Ein neuer Zustand beginnt immer dann, wenn ein WFP oder eine LSS hinzukommt oder wegfällt, entsprechend auch eine Funktion hinzukommt oder wegfällt. Ein neuer Zustand beginnt ebenfalls, wenn sich die Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente in einem funktionsrelevanten Umfang ändern. Jeder Zustand hat mindestens zwei Connectoren.
- **Sequenz:** Eine Sequenz ist eine determinierte Abfolge von mindestens zwei Zuständen. Eine neue Sequenz muss definiert werden, wenn sich die Abfolge der Zustände ändert, sich Zustände in einem funktionsrelevanten Umfang ändern oder neue Zustände hinzukommen bzw. wegfallen.

Wichtige Aspekte bei der Umsetzung

Der Übergang zwischen zwei Zuständen ist als unendlich kurz definiert, da der Zeitpunkt des Hinzukommens und des Wegfallens eines WFP als unendlich kurz angesehen werden kann. Bei der Änderung der Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente muss der Zeitpunkt bestimmt werden, ab dem die Änderung funktionsrelevant wird. Ab diesem Zeitpunkt beginnt ein neuer Zustand.

²⁹⁶ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Da ein Zustand durch die Anzahl der WFP definiert wird, ist er vom geometrischen Detaillierungsgrad abhängig. Wird die geometrische Detaillierung erhöht, kann aus einer Funktion oder einem Gestaltfunktionselement eine Vielzahl an Funktionen bzw. Gestaltfunktionselementen werden. In diesem Fall wird empfohlen auch die zeitliche Detaillierung zu erhöhen, sprich aus dem Zustand eine Sequenz zu definieren (siehe Abbildung 32). So wurde z.B. in der Analyse des WFP 1 zwischen Schraube und Untergrund nicht nur mehrere WFP und LSS, sondern auch aus einem Zustand eine Sequenz mit sechs Zuständen (siehe Abbildung 34 bis Abbildung 36).

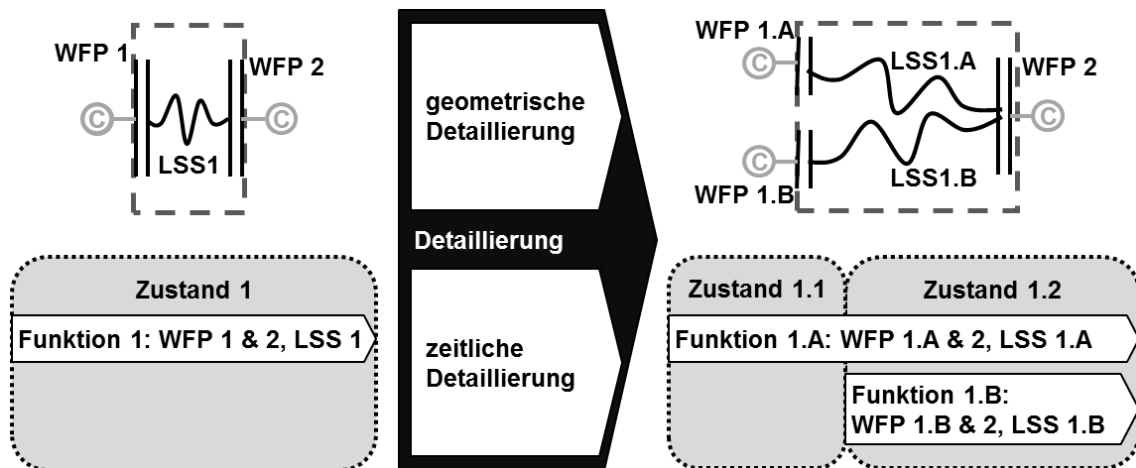


Abbildung 32: schematische Darstellung - eine geometrische Detaillierung bringt oft eine zeitliche Detaillierung des C&C²-Modells mit sich²⁹⁷

Es muss bestimmt werden, über welchen Zeitraum ein Zustand und die darin beschriebenen Funktionen und Gestaltfunktionselemente wirken. Die zeitliche Differenzierung ermöglicht die Bestimmung von Wechselwirkungen bzw. Abhängigkeiten zwischen Funktionen bzw. Gestaltfunktionselementen, die parallel oder zeitlich versetzt wirken können. Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, beeinflusst WFP A1 sowohl Zustand 1 als auch Zustand 2, wohingegen WFP B2 erst in Zustand 2 hinzukommt und daher in Zustand 1 keine Wirkung auf die Funktionserfüllung hat.

An verschiedenen Orten der Funktionserfüllung (siehe Kapitel 5.3) können gleichzeitig Zustände stattfinden und sich gegenseitig beeinflussen. Die Wechselwirkungen über Systemgrenzen hinweg können Funktionen verändern oder eliminieren, so dass neue Zustände bzw. Sequenzen definiert werden müssen (siehe Abbildung 33). So können die Funktionen, bzw. die Gestaltfunktionselemente in Zustand 2.2 dazu führen, dass

²⁹⁷ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Zustand 1.4 und Zustand 1.5 nicht mehr stattfinden. Wechselwirkungen zwischen Sequenzen können zur Veränderung von Zuständen bzw. Sequenzen führen. *Ein Beispiel hierfür ist das Bitspringen im WFP II, was einen Stopp der Sequenz im WFP I verursacht (siehe Beispiel in Abbildung 39).*

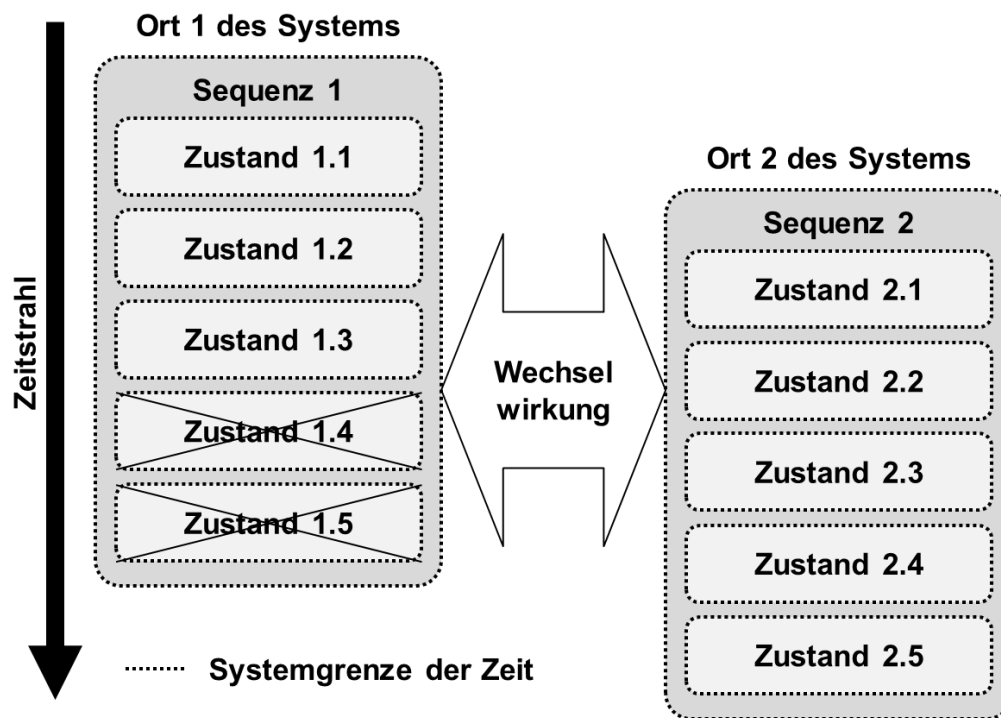


Abbildung 33: Schematische Darstellung - Wechselwirkungen der Funktionen und Gestaltfunktionselemente der einzelnen Zustände bzw. Sequenzen²⁹⁸

Beispiele für die Umsetzung

Analyse in WFP I des Beispielsystems 1

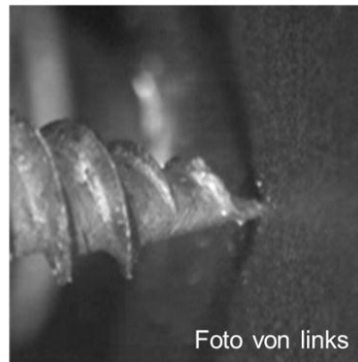
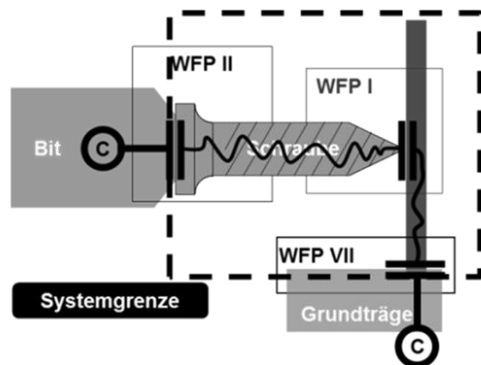
In Abbildung 29 wird dargestellt, welche WFP analysiert werden, um die Schraube in ihrer Funktionsweise zu verbessern. Dafür wird unter anderem die Detaillierung in WFP I erhöht, um die für die Funktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“ relevanten Gestaltfunktionselemente zu bestimmen. Im Projekt werden sechs Zustände definiert (siehe Abbildung 34), die zusammen die Sequenz des WFP I darstellen.²⁹⁹

²⁹⁸ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

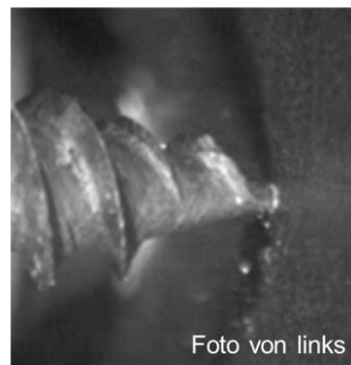
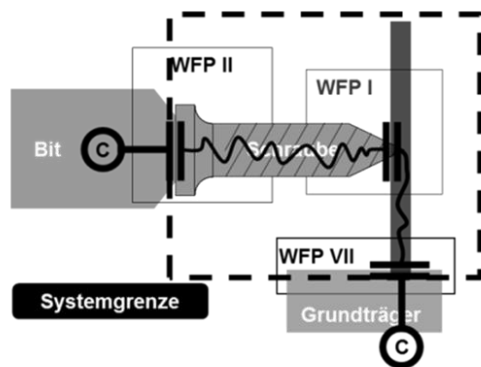
²⁹⁹ Siehe Kapitel 5.3

Sequenz der selbstpenetrierender Schrauben

1. Zustand: Schraube köhrt d. Untergrund



2. Zustand: Schraube köhrt und verdrängt den Untergrund



3. Zustand: ...

4. Zustand: ...

5. Zustand: ...

6. Zustand: Schraube dreht sich quasi ohne Moment ein

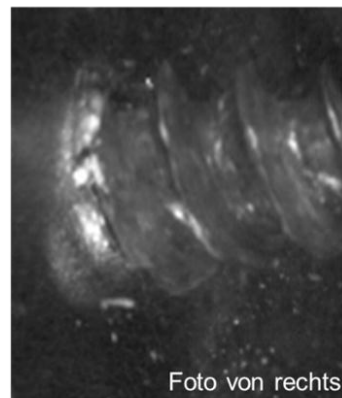
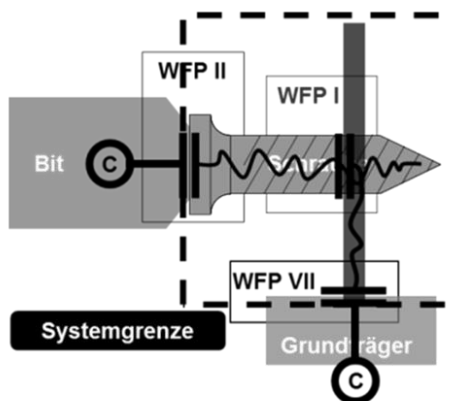


Abbildung 34: eine mögliche Sequenz des WFP Spitze – Untergrund beim Einschraubprozess³⁰⁰

³⁰⁰ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Im Folgenden wird am Beispiel von Zustand 1 und Zustand 2 beschrieben, wie ein Sequenzmodell aufgebaut werden kann. In Zustand 1 findet nur eine Funktion statt, die im Projekt als „Schraube körnt den Untergrund“ bezeichnet wird. An dieser Funktion ist das WFP A1 zwischen Stirnseite der Schraube und Untergrund maßgeblich beteiligt. Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, findet im WFP A1 die Wirkung „Körnen“ statt. Zustand 2 beginnt in dem Moment, in dem das WFP B2 und die Funktion „Schraube verdrängt den Untergrund“ hinzukommen. Im WFP B2 findet die Wirkung „Verdrängen“ statt. Die beiden WFP werden auf Grund ihrer unterschiedlichen Ausrichtung zur Vorschubbewegung der Schraube unterschieden. So ist eine differenzierte Optimierung der beiden Funktionen möglich.

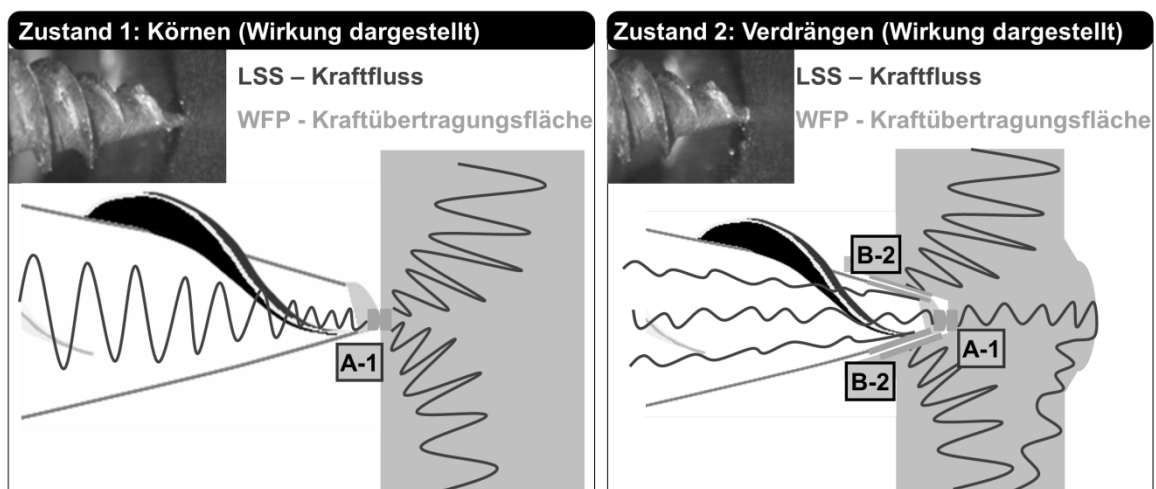


Abbildung 35: Zustand 1 und 2 des Sequenzmodells bei WFP I – durch die Detaillierung werden daraus viele WFP und dazugehörige LSS, Funktionen in verschiedenen Zuständen³⁰¹

Folgende Erklärung soll zeigen, warum es sinnvoll ist, die WFP und damit die Funktionen zu differenzieren: WFP A1 existiert im Einschraubprozess kürzer als WFP B2. Wie in Abbildung 36 zu sehen ist, existiert WFP A1 in Zustand 6 nicht mehr, WFP B2 hingegen schon. Zustand 6 kann folglich nicht von dem WFP A1, aber von WFP B2 beeinflusst werden. Durch diese Differenzierung kann jeder einzelner Zustand optimiert werden, da bekannt ist, welche WFP, LSS und damit Funktionen wirken. In diesem Fall muss das WFP A1 nur für einen Teil der Zustände optimiert werden, WFP B2 hingegen für den gesamten Einschraubvorgang.

³⁰¹ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

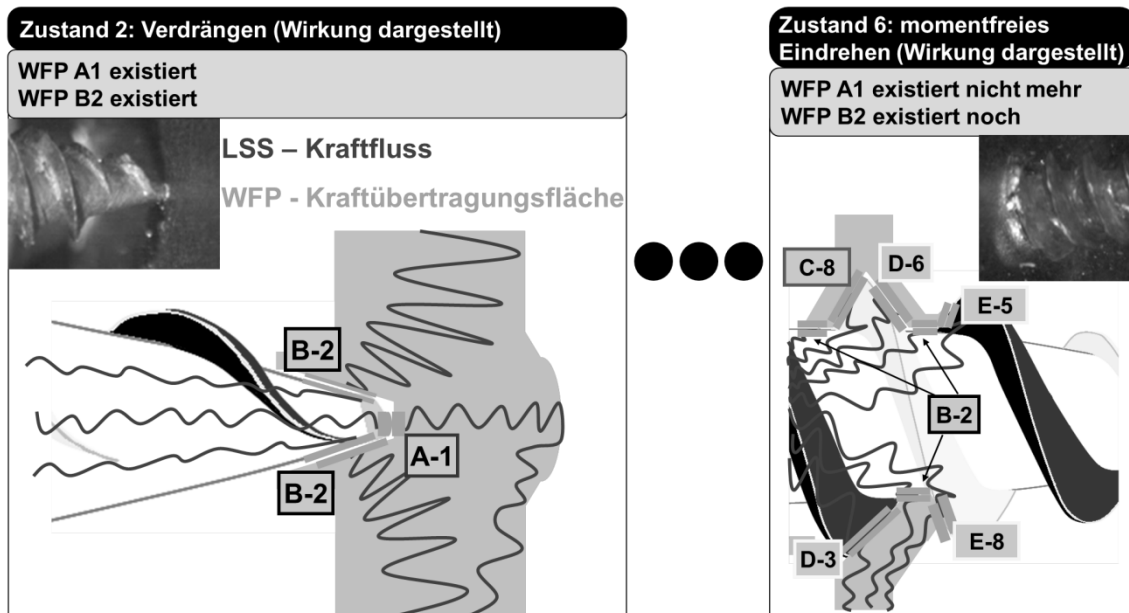


Abbildung 36: WFP, LSS und damit Funktionen können unterschiedlich lange existieren³⁰²

Anmerkung: Wie schon in den vorherigen Kapiteln beschrieben, muss nicht jede Abbildung das komplette C&C²-Modell darstellen. So sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 lediglich die Wirkungen der Funktion dargestellt. Die Abbildung stellt also nur einen Teil des C&C²-Modells dar. Die Funktion zur Wirkung „Körnen“ lautet „Spitze körnt den Untergrund“ und wird in Abbildung 34 vollständig dargestellt. Hier wird gezeigt, dass die Funktion mit den WFP II; WFP I und WFP VII, sowie der LSS in der Schraube und im Untergrund definiert ist.

Analyse im WFP II des Beispielsystems 1

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, wird auch an WFP II (siehe Abbildung 28) die Detaillierung der Analyse erhöht, um die Hauptfunktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“ mit dem C&C²-Modell ausreichend genau beschreiben und damit die Funktion verbessern zu können. Die Sequenz im WFP I ist hierfür alleine nicht ausreichend.

Bei einer idealen Sequenz in WFP II (siehe Abbildung 37) wird der Bit durch die WFP zwischen Bit und Recess³⁰³ geführt bzw. zentriert (Zustand 1), um anschließend eine Klemmung zwischen Bit und Recess herbeizuführen (Zustand 2). Dies ermöglicht

³⁰² Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

³⁰³ Z.B. der Phillips Kreuzschlitzantrieb

während des Setzprozesses eine Anpresskraft- und Drehmomentübertragung (Zustand 3), bevor im letzten Zustand der Bit aus dem Recess gelöst wird (Zustand 4).



Abbildung 37: ideale Sequenz am WFP II - zwischen Bit und Recess³⁰⁴

Beim Bitspringen wird Zustand 3 der Sequenz am WFP II zu einer eigenen Sequenz (rechts in Abbildung 38), die sich sehr oft wiederholen kann und dadurch die Drehmoment- und Anpresskraftübertragung in WFP I lange unterbrechen kann. Die Sequenz besteht aus 4 Zuständen: aus der Drehmomentübertragung (Zustand 3.1) springt der Bit aus dem Recess (Zustand 3.2). Anschliessend muss der Bit erst wieder im Recess einkuppeln (Zustand 3.3), um weiter Drehmoment übertragen zu können (Zustand 3.4).

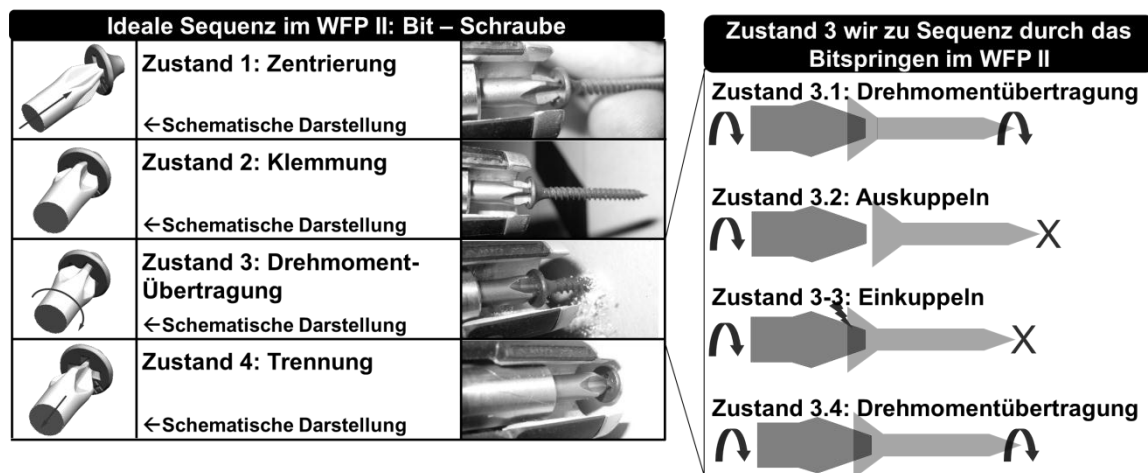


Abbildung 38: schematische Darstellung der Sequenz des Bitspringens zwischen Recess u. Bit

³⁰⁴ Vgl. Schwerdtfeger 2007

Das Bitspringen wird entdeckt, da die Sequenz im WFP I in manchen Zuständen eine erheblich längere Zeitspanne aufweist oder gar angehalten wird, obwohl der Schrauber dreht (siehe Abbildung 39). Daraufhin wird die Systemgrenze erweitert (siehe Abbildung 28) und WFP II zeitlich, geometrisch und stofflich detaillierter untersucht und im C&C²-Modell abgebildet: wie sieht der ideale (ohne Bitspringen) und der nicht ideale (mit Bitspringen) Einschraubprozess aus. Aus dem im Modell dargestellten Systemverständnis können Massnahmen abgeleitet werden, um ein Bitspringen zu vermeiden. Und das Modell zeigt, warum die Setzqualität der Schraube nicht nur durch die WFP und LSS zwischen Spitze und Untergrund (WFP I), sondern auch durch die WFP und LSS zwischen Schraube bzw. Recess und Bit (WFP II) beeinflusst wird.

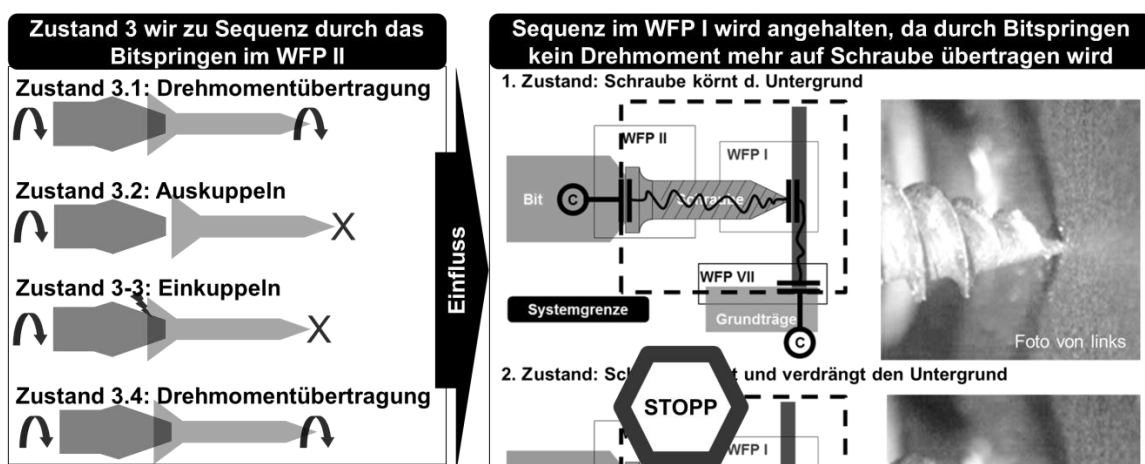


Abbildung 39: Funktionen im WFP II beeinflussen die Funktionen in WFP I – sie verlangsamen oder stoppen die Funktionen in den Zuständen der Sequenz an WFP I

Die Schraube ist ein sehr anschauliches Beispiel wie sich Sequenzen gegenseitig beeinflussen können. Daher ist es wichtig auch die Wechselwirkungen zwischen Sequenzen bzw. Zuständen verschiedener Sequenzen zu beachten (siehe auch Abbildung 33). Mehr dazu in Kapitel 5.4.

Merksatz zur Systemgrenze der Zeit

Zu einem instationären System muss im C&C²-Modell eine Systemgrenze der Zeit definiert werden. Dafür werden Zustände und Sequenzen definiert, wobei die Zustände über Anzahl und die Eigenschaften der relevanten Funktionen, Gestaltfunktionselemente und Connectoren definiert werden.

5.3 Ort der Funktionserfüllung [ODF]

In einem C&C²-Modell sollten nur die für die Zielerreichung relevanten Funktionen dargestellt werden. Als „relevant“ für die Analyse, Synthese bzw. Problemlösung gelten die Funktionen, die die Gesamtfunktion³⁰⁵ maßgeblich bestimmen.³⁰⁶ Die Gesamtfunktion wird, wie alle Funktionen, durch die Eigenschaften der an den Funktionen beteiligten Gestaltfunktionselemente bestimmt.³⁰⁷ Es kann vorkommen, dass die Eigenschaften einer Funktion die Gesamtfunktion besonders stark beeinflussen. In diesem Fall können die Gestaltfunktionselemente dieser Funktion als besonders relevant eingestuft werden. Veränderungen der Eigenschaften dieser Gestaltfunktionselemente haben einen starken Einfluss auf die Gesamtfunktion. Es kann hilfreich sein dieses WFP bzw. diese LSS ins Zentrum der Analyse bzw. Optimierung zu stellen. Dieses für die Zielerreichung besonders bedeutende Gestaltfunktionselement wird als „Ort der Funktionserfüllung“ [ODF] bezeichnet. Dabei ist zu betonen, dass ein ODF kein Bauteil, keine Funktion oder ein C&C²-Modell ist, sondern ein Teil einer oder mehrerer Funktionen. *Im Beispielsystem 1 der selbstpenetrierenden Schraube wird das WFP I ins Zentrum des Modells genommen. So können die Eigenschaften der Funktionen und Gestaltfunktionseigenschaften zwischen Schraubenspitze und Untergrund besser analysiert werden (siehe Abbildung 28).*

Elemente und Definitionen³⁰⁸

- **Ort der Funktionserfüllung [ODF]:** Der Ort der Funktionserfüllung ist ein Gestaltfunktionselement (WFP oder LSS) einer oder mehrerer Funktionen, dessen stoffliche und geometrische Eigenschaften für die Gesamtfunktion des technischen Systems besonders relevant sind. Der ODF stellt beim Aufbau des Systemverständnisses einen Analyseschwerpunkt dar. Oft wird in einem ODF die Detaillierung erhöht, wodurch sich das Gestaltfunktionselement in viele Gestaltfunktionselemente, Funktionen und Zustände aufteilt. Der Kern der Synthese besteht darin, die Gestalteigenschaften dieser Gestaltfunktionselemente zu optimieren.

³⁰⁵ Kann auch als „Hauptfunktion“ bezeichnet werden

³⁰⁶ Vgl. Pahl/Beitz et al 2006 auf S. 44ff: Definition von Funktionen

³⁰⁷ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 57ff

³⁰⁸ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Wichtige Aspekte bei der Umsetzung

In den empirischen Studien ist die Mehrzahl der ODF ein WFP. Der Kern des Erfolges in den Projekten ist die Gestalteigenschaften und damit die Wirkung des WFP zu optimieren. In der Anwendung des ODF zeigt sich, dass Anwender ein WFP als ODF definiert, wenn er hinter dem WFP eine Vielzahl an WFP und LSS vermutet. Er hat also in dem Moment, in dem er den ODF definiert, schon die Intention die Detaillierungsstufe der Zeit und der Gestalt an dieser Stelle zu erhöhen. *So besteht auch im Beispielsystem 1 der Schraube von Anfang an die Intention Detaillierung im WFP I zu erhöhen: die Vermutung ist, dass die Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente im WFP I (zwischen Spitze und Untergrund) die Funktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund ein“ besonders stark beeinflussen. In diesem Fall wird aus einem WFP eine Vielzahl an WFP und aus dem Zustand wird eine Sequenz (siehe Abbildung 34).*

Die Festlegung eines ODF orientiert sich immer am Ziel und Wissen des Modellerstellers und ist daher dynamisch. ODF können verändert, bekannte ODF eliminiert oder neue ODF hinzugefügt werden. Je größer das System ist, desto frühzeitiger sollten ODF bestimmt werden. Experten können auf Grund ihres Systemverständnisses meist frühzeitig und zuverlässig ODF definieren.

Ein ODF kann auch über das Ausschlussprinzip bestimmt werden. Es kann leichter sein, den Betrachtungsraum nicht an den relevanten Orten, sondern an den nicht relevanten Orten auszurichten. Auf diese Weise kann der Betrachtungsraum verkleinert und die Effizienz der Analyse gesteigert werden. *Im Beispiel der selbstpenetrierenden Schraube wird der Schrauber fest im Prüfstand montiert (siehe WFP IV in Abbildung 40). So kann ausgeschlossen werden, dass es sich hierbei um einen ODF handelt. Ähnliches gilt für WFP V, VI und VII.*

Beispiele für die Umsetzung

In dem Projekt zur Optimierung der Schraubenspitze (Beispielsystem 1) stellen sich mehrere WFP als besonders relevant heraus. Naheliegender Weise wird bei der Funktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“ als Erstes das WFP I zwischen Schraubenspitze und Untergrund zu einem ODF definiert und genauer analysiert. Durch die detailliertere Analyse wird aus dem WFP I eine Reihe von WFP und LSS, aus dem Zustand bzw. der stationären Betrachtung wird eine Sequenz (siehe Abbildung 34).

Die Analyse im ODF I zeigt, dass nach weiteren ODF gesucht werden muss, um das Ziel zu erreichen: die Setzeigenschaften der Schrauben können nicht alleine durch die Optimierung der Eigenschaften der WFP und LSS zwischen Schraubenspitze und Untergrund optimiert werden.

Daher wird WFP II zu einem ODF definiert. Auch hier werden auf Grund der Detaillierung der Zeit- und Gestaltbeschreibung aus dem WFP wird eine Reihe von WFP und LSS, aus dem Zustand wird eine Sequenz (siehe Abbildung 37). Dabei wird festgestellt, dass ODF I und ODF II interagieren und sich gegenseitig in den Zuständen beeinflussen. Später wird auch noch WFP III zu einem ODF definiert, da auch hier eine Detaillierung notwendig ist, um die Funktionsweise der Schraubenspitze zu optimieren (siehe auch Kapitel Abbildung 40).

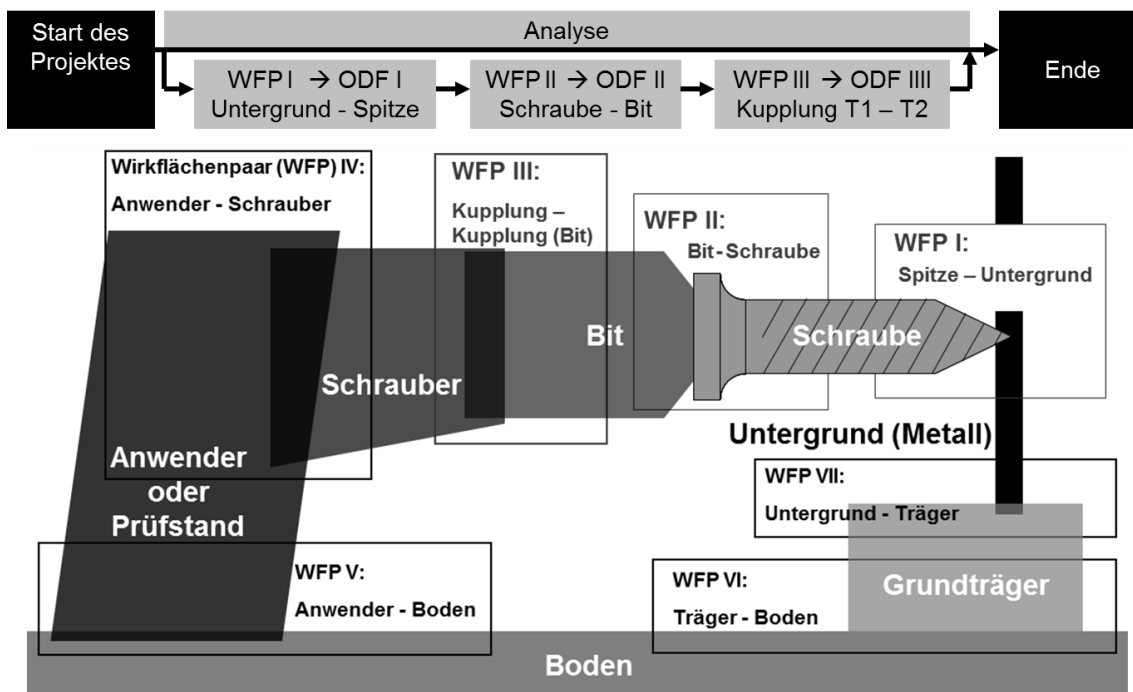


Abbildung 40: Orte der Funktionserfüllung im Beispiel der der Schraubenoptimierung³⁰⁹

Das technische System der Schraube ist ein anschauliches Beispiel, wie die Definitionen von ODF helfen können, sich bei der Analyse auf die relevanten Gestaltfunktionselemente zu fokussieren.

³⁰⁹ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Merksätze zum Ort der Funktionserfüllung

Wenn ein oder mehrere Gestaltfunktionselemente einer oder mehrerer Funktionen für die Gesamtfunktion als besonders relevant eingestuft werden, sollten diese als ODF definiert werden und die Detaillierung der Betrachtung der Zeit und Gestalt an dieser Stelle erhöht werden. Die Analyse und Synthese dieser Gestaltfunktionselemente sind besonders wichtig für die Zielerreichung.

Handelt es sich beim ODF um ein oder mehrere WFP, sollten die Eigenschaften der WF so verändert werden, dass sich die Wirkungen und damit die Funktionen, an denen das WFP beteiligt ist, verbessert werden.

5.4 Kammstruktur [KS]

Es kann als herausfordernd bezeichnet werden, technische Systeme zu erfassen und in einem C&C²-Modell darzustellen, wenn das System viele Funktionen und Gestaltfunktionselemente besitzt. Es besteht die Gefahr, dass das Modell des technischen Systems zu groß und unübersichtlich wird, da es zu viele Details enthält.

Mit dem ODF wird eine Hilfestellung geboten, sich bei dem Aufbau des Modells zum technischen System auf einen Ort zu konzentrieren. Um ein zielführendes C&C²-Modell eines technischen Systems aufzubauen, ist es oft notwendig viele ODF zu definieren (siehe Abbildung 40). Mit dem C&C²-Ansatzes kann die Darstellung eines komplexen technischen Systems vereinfacht werden. Der fraktale Charakter³¹⁰ des C&C²-Ansatzes erlaubt das technische System in beliebig vielen unterschiedlichen gestalterischen und zeitlichen Detaillierungsebenen im C&C²-Modell darzustellen. So kann z.B. die Detaillierung der Analyse zwischen Schraubenspitze und Untergrund sehr hoch sein und mit wenig detaillierten Analyseergebnisse zu den WFP zwischen Schraube und Bit bzw. zwischen Schrauber und Anwender oder Prüfstand in einem C&C²-Modell kombiniert werden. Hierbei hat es sich bewährt, das Modell nach einer Kammstruktur aufzubauen (siehe Abbildung 41 unten). Der Name der Heuristik ist auf die Detaillierungsstruktur des Modells zurückzuführen (sie ähnelt einem Kamm) und hat nichts mit der Struktur des technischen Systems zu tun.

Angenommen sei ein System mit den WFP A, B, C, D und WFP 1, 2, 3 und den LSS zwischen den WFP und den Connectoren an der Systemgrenze der Gestalt (siehe

³¹⁰ Vgl. Albers et al 2008b auf S. 5

Abbildung 41). Als besonders relevant haben sich die WFP 1, 2, und 3 erwiesen. Daraufhin werden die WFP zu ODF (ODF 1, ODF 2 und ODF 3) definiert. Diese werden detaillierter analysiert, wodurch aus einem Gestaltfunktionselement eine Vielzahl an Gestaltfunktionsparametern werden (aus dem WFP 1, 2 und 3 werden viele WFP und LSS). Des Weiteren wird im ODF aus einem Zustand oft eine Sequenz mit mehreren Zuständen (Sequenz 1, 2 und 3).

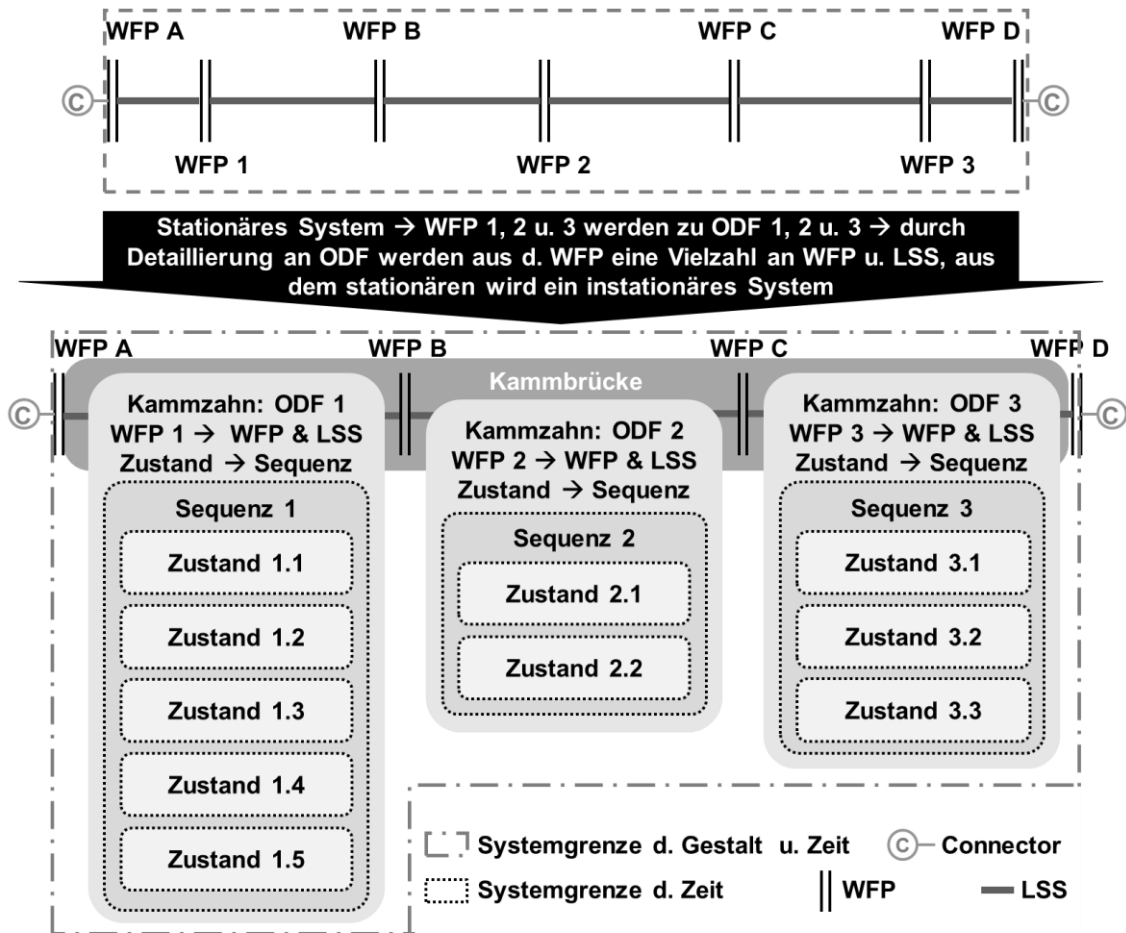


Abbildung 41: schematische Darstellung - Kammartige Detaillierungsstruktur eines C&C²-Modells³¹¹

Die restlichen WFP (WFP A, B, C und D) und die LSS, insofern sie nicht auch zu einem ODF definiert werden, können weiterhin wenig detailliert im C&C²-Modell dargestellt werden. Ihre Eigenschaften haben keinen relevanten Einfluss auf die Gesamtfunktion. Diese Elemente sind Teil der Kammbrücke, die die ODF verbindet. Wie bereits dargestellt, können sich die Gestaltfunktionsparameter verschiedener ODF

³¹¹ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

beeinflussen, indem Energie und Information über die Kammbrücke ausgetauscht werden. Auch ALINK beschreibt dieses Vorgehen und bezeichnet es als „Opportunistische Vorgehensweise“.³¹²

Elemente und Definitionen³¹³

- **Kammstruktur** ist ein Aufbau für C&C²-Modelle, bei der das technische System über detaillierte Darstellungen an den ODF (Kammzähne) und wenig detaillierten Darstellung für die Verbindung der ODF (Kammbrücken) erfasst wird. Das Gesamtbild dieser Detaillierungsstruktur ähnelt einem Kamm (siehe Abbildung 41) und dient dazu die Übersichtlichkeit zu erhalten.
- **Kammbrücke**: Weniger relevante Gestaltfunktionselemente innerhalb der Systemgrenzen werden weniger detailliert dargestellt. Sie verbinden die ODF und bilden die Kammbrücke. Wechselwirkungen, bzw. Kraft und Information zwischen den einzelnen Funktionen und Gestaltfunktionselementen in den ODF werden über die WFP und LSS in den Kammbrücken übertragen.
- **Kammzähne**: Die ODF sind die Zähne des Kammes. An diesen besonders relevanten Gestaltfunktionsparametern wird die gestalterische und zeitliche Detaillierung erhöht. Die Optimierung der Wirkungen in den ODF ist oft Kern der Entwicklungsarbeit.

Wichtige Aspekte bei der Umsetzung

Der Startpunkt bzw. das Vorgehen beim Modellaufbau ist beliebig. Es kann sowohl mit einem kleineren und detaillierten Betrachtungsraum begonnen werden, um anschließend den Betrachtungsraum zu vergrößern und die Detaillierung zu verringern (BOTTOM→UP). Hier wird der Modellaufbau in den ODF begonnen. Dies hat sich als zielführend herausgestellt, wenn schon Systemverständnis im Team vorhanden ist.

Oder es wird mit einem großen Betrachtungsraum begonnen, der alle vermutlichen ODF einschließt, um anschließend an den ODF die Detaillierung zu erhöhen (TOP→DOWN). Hier wird der Modellaufbau mit der Kammbrücke begonnen. Dieses Vorgehen hat sich bei der Analyse von Systemen als zielführend erwiesen, über die noch wenig Wissen im Team vorhanden ist.

³¹² Vgl. Alink 2010 auf S. 144

³¹³ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Beispiele für die Umsetzung

In dem Beispiel der selbstpenetrierenden Schraube werden die WFP I (Untergrund – Spitze), das WFP II (Recess – Bit) und das WFP III (Kupplungsteil 1 und 2) zu ODF erklärt (Abbildung 42).

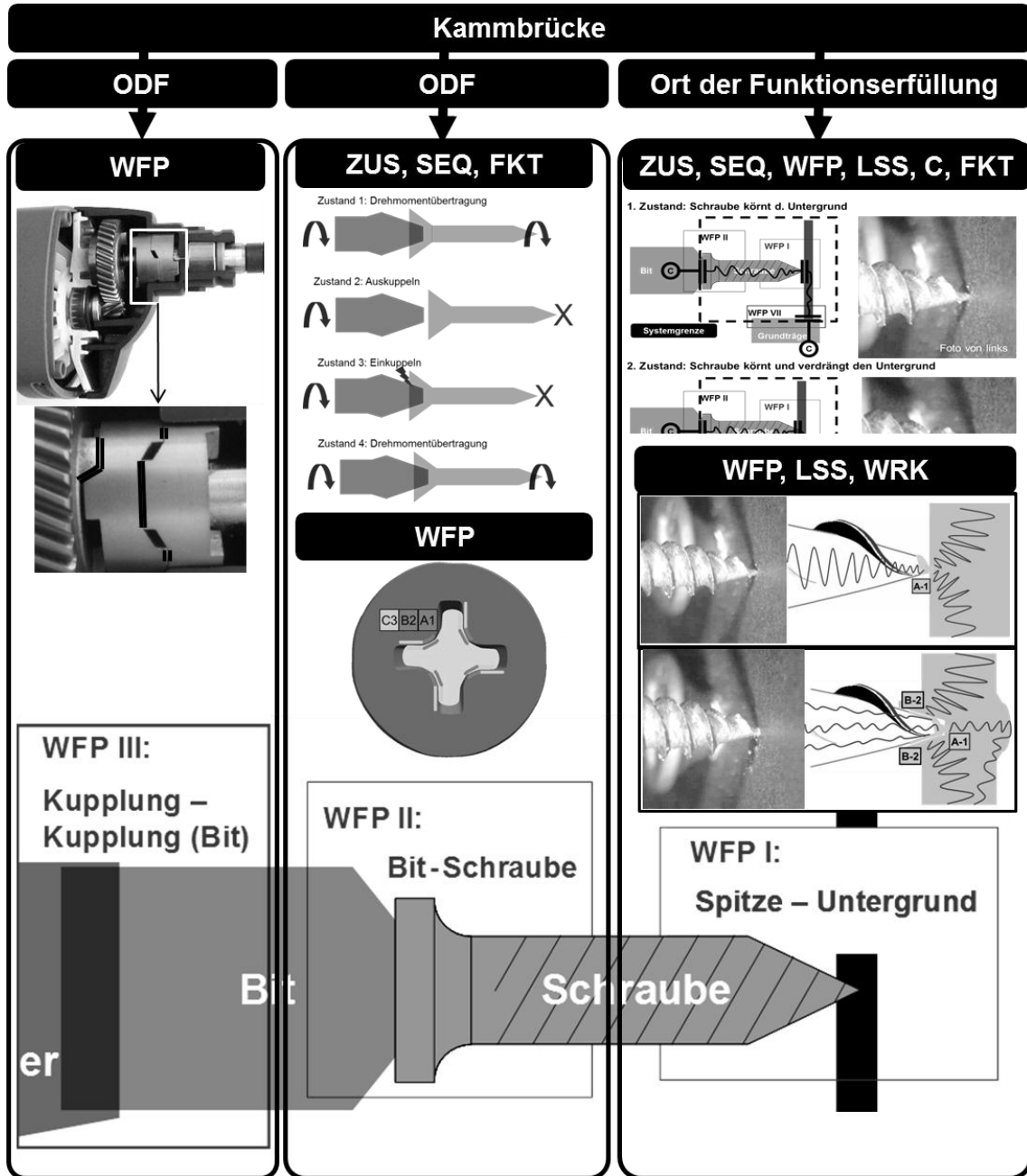


Abbildung 42: Kammartige Detaillierungsstruktur des C&C²-Modells des Schraubenbeispiels³¹⁴

³¹⁴ Vgl. Albers et al 2008b und Albers et al 2008c

Jeder ODF muss detaillierter (Zeit und Gestalt) analysiert werden, um ein für die Zielerreichung ausreichendes Systemverständnis zu erlangen. So können die Wirkungen im WFP I nur verbessert werden, indem die vielen WFP zwischen der Spitze und dem Untergrund und die vielen Zustände während des Einschraubvorganges einzeln betrachtet und optimiert werden: wie z.B. die WFP und Wirkungen in Zustand 1 und Zustand 2 in Abbildung 35. Gleichzeitig ist die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den ODF über die Kammbrücken von immenser Bedeutung, um das System ausreichend zu verstehen. Eine Schraube, die Bitspringen aufweist, kann optimale WFP zwischen Schraubenspitze und Untergrund aufweisen und wird dennoch schlechte Setzeigenschaften besitzen. Der Erfolg dieser Vorgehensweise ist, dass die ODF des technischen Systems detailliert genug und gleichzeitig die Verbindung dieser Orte über die Kammbrücken erfasst werden können.

Das Beispiel zeigt, dass die Heuristik „ODF“ und die Heuristik „Kammstruktur“ in der Anwendung oft eng miteinander verbunden sind. Wobei die Darstellungen zum Modell nicht alle zusammengeführt werden müssen, wie es in Abbildung 42 der Fall ist. Die Summe der einzelnen Darstellungen würde aber wiederum eine Kammstruktur aufweisen.

Merksätze zur Kammstruktur

Besitzt ein technisches System eine Vielzahl an ODF, wird empfohlen das C&C²-Modell kammartig aufzubauen, indem die ODF detailliert und die Verbindungen zwischen den ODF wenig detailliert analysiert und dargestellt werden.

5.5 Bestandteile eines C&C²-Modells

Den C&C²-Ansatz anzuwenden, bedeutet ein C&C²-Modell eines technischen Systems aufzubauen. Dies kann entweder mit oder ohne eine explizite Darstellung³¹⁵ geschehen. Je komplexer das System und je größer das Team, umso zielführender ist ein explizites Modell. Als Faustregel kann hier angeführt werden: ab zwei Personen oder ab mehr als einer Funktion, sollte ein explizites Modell aufgebaut werden.³¹⁶ Eine explizite Darstellung verbessert die Kommunikation zwischen den Teammitgliedern

³¹⁵ Unter „explizite Darstellung“ wird hier verstanden, dass das Modell in einer beliebigen Art und Weise dargestellt wird (z.B. in handschriftlichen Skizzen, Power Point Folien, etc.)

³¹⁶ Vgl. Meboldt 2008 auf S. 107

und damit den Aufbau des intersubjektiven Systemverständnisses.³¹⁷ ALINK gibt eine Reihe nützlicher Hinweise für die Darstellung eines C&C²-Modells. Z.B. schlägt er vor, „dass Funktionen grundsätzlich als Beschreibung der Interaktion des betrachteten Systems mit Nachbarsystemen aufgefasst werden sollten.“³¹⁸

Wie in Kapitel 2 dargestellt, kann mit Hilfe des C&C²-Ansatz Systemverständnis dargestellt werden, indem Funktion und Gestalt verknüpft werden. Somit ist die Darstellung der Gestaltfunktionselemente und der Funktionen in jedem C&C²-Modell zwingend notwendig. Ein C&C²-Modell eines technischen Systems kann nicht ohne Gestalt und nicht ohne Funktion existieren. Die Grundhypothesen beschreiben, wie die Gestaltfunktionselemente und Funktion im C&C²-Modell zu verknüpfen sind.

Elemente und Definitionen

Es existieren folgende Elemente in einem C&C²-Modell. Es kann zwischen den obligatorischen Elementen und den ergänzenden Elementen unterschieden werden. Hierbei ist zu beachten, dass ein C&C²-Modell aus einer Beschreibung und mehreren Darstellungen bestehen kann. Die Summe der Beschreibungen und Darstellungen muss den Definitionen des C&C²-Ansatzes entsprechen.

- **Obligatorische Elemente**, die immer in mindestens einer Darstellung des C&C²-Modells dargestellt und beschrieben sein müssen:
 - Mindestens eine Funktion (Eigenschaften)
 - Mindestens zwei WFP, bestehend aus je zwei WF (Gestalt und Eigenschaften)
 - Ein Connector pro WFP an der Systemgrenze, so dass die Systemgrenze der Gestalt (geometrische Definition des Betrachtungs- bzw. Gestaltungsraumes eines Modells und die Wechselwirkungen zu benachbarten System definiert werden können
 - Mindestens eine LSS, die zwei WFP verbindet (Gestalt und Eigenschaften)

³¹⁷ Albers hat in einer Diskussion 2011 angemerkt, dass der C&C²-Ansatz sowohl als Denkhilfe bzw. Denkmodell zu sehen ist. Gerade beim Arbeiten im Team eine Darstellung des C&C²-Modellen zum technischen System die Zusammenarbeit, bzw. die Verständigung erheblich verbessert.

³¹⁸ Alink 2010: S: 198

- **Obligatorische Elemente**, die nicht immer dargestellt, aber beschrieben sein müssen:
 - Systemgrenze der Zeit: Zustand und Sequenz (zeitliche Definition des Betrachtungs- bzw. Zeitraumes eines Modells und seiner Funktionen)
- **Ergänzende Elemente**, die sinnvoller Weise beschrieben werden sollten (aber nicht immer existieren oder beschrieben werden können)
 - Orte der Funktionserfüllung³¹⁹
 - Kammstruktur³²⁰

Wichtige Aspekte bei der Umsetzung

Die Abstraktionsebene bei der Darstellung der Gestaltfunktionselemente ist frei wählbar. Es hat sich jedoch bewährt, die Gestaltfunktionselemente möglichst realitätsnah darzustellen.³²¹ Tendenziell gilt, je abstrakter die Darstellung, desto schwieriger ist die Übertragbarkeit zwischen Modell und technischem System, z.B. aus der Gestalt einen Reib- oder Formschluss abzuleiten. Funktionen sollten möglichst eindeutig und pragmatisch beschrieben werden. Bewährt hat sich hier eine Kombination aus einem Substantiv und einem Verb: z.B. „Material nach oben verdrängen“. Die Darstellung in einem C&C²-Modell kennt keine fest vorgeschriebene Detaillierungsebene. Der C&C²-Ansatz ist fraktal, das bedeutet dass Gestaltelemente und Funktionen aller Abstraktions- und Detaillierungsebenen in einem C&C²-Modell dargestellt und verknüpft werden können.

Für die Darstellung von C&C²-Modellen haben sich folgende Hilfsmittel bewährt:

- Um die Gestalt darzustellen, können Skizzen, Zeichnungen, Fotos, Abbildungen aus Videos und Simulationsprozessen, etc. verwendet werden.
- Gestaltfunktionselementen sollten Namen oder Nummern geben werden, um die Zuordnung der Funktionen zu den Gestaltfunktionselementen zu verbessern.
- Technische Hilfsmittel können Computer, Papier, Stifte und Prototypen sein.

³¹⁹ Siehe Kapitel 5.3

³²⁰ Siehe Kapitel 5.4

³²¹ Aussage von Albers in einer Diskussion 2011

C&C²-Modelle technischer Systeme sollten nicht vollständig, sondern zielorientiert aufgebaut werden. Dargestellt werden nur für die Zielerreichung relevanten Elemente. Elemente, die die Zielerreichung verhindern, gelten ebenfalls als relevant. Ein C&C²-Modell ist dann unvollständig oder falsch, wenn die Beschreibung und die Summe der Darstellungen entweder den Definitionen und den Grundhypothesen widersprechen, oder das technische System nicht so wiedergegeben wird, wie es für die Zielerreichung notwendig wäre.

Bei der Definition der Funktionen, LSS und WFP im C&C²-Modell hat es sich bewährt zu unterscheiden, ob es sich um „Wissen“ (bewiesene Aussagen zu Funktionen, Gestalt und deren Zusammenhänge), „Hypothesen“ (vermutete Aussagen zu Funktionen, Gestalt und Zusammenhänge) oder „Ideen“ (Ansätze, um Funktionen, Gestalt und Zusammenhänge für die Analyse oder Synthese zielführend zu verändern) handelt. Dies schützt vor falschen Annahmen und gerade bei Gruppendiskussionen hilft diese Unterscheidung zwischen subjektivem und intersubjektivem Systemverständnis zu unterscheiden.³²²

Beispiele für die Umsetzung

Um die wichtigsten Funktionen, Wirkungen, WFP, LSS, Sequenzen bzw. Zustände, Systemgrenzen bzw. Connectoren und die Heuristiken zum Modellaufbau im Beispielsystems 1 aufzuzeigen, sind diese in Abbildung 43 zusammengefasst. Das C&C²-Modell im Projekt besteht aus vielen verschiedenen Darstellungen, um die notwendigen Details für die Zielerreichung darstellen zu können. Die Abbildung dient an dieser Stelle als Zusammenfassung, um die letzten Kapitel zu wiederholen.

Im Zuge der Analyse wird um WFP I, WFP II und WFP III eine Systemgrenze der Gestalt (SGG) gezogen. Alle drei WFP werden als Orte der Funktionserfüllung (ODF) definiert und die Detaillierung der Betrachtung von Gestalt und Zeit an diesen Orten erhöht. Durch die Detaillierung wird aus einem WFP eine Vielzahl an WFP bzw. LSS und aus einem Zustand wird eine Sequenz mit mehreren Zuständen. Es wird eine Systemgrenze der Zeit (SGZ) für die ODF definiert. Die Darstellung zeigt, wie durch die Detaillierung in den ODF ein C&C²-Modell mit einer Kammstruktur entsteht.

³²² Vgl. Albers et al 2011: Prozessschritt „P“ im Problemlösungsprozess „SPALTEN“

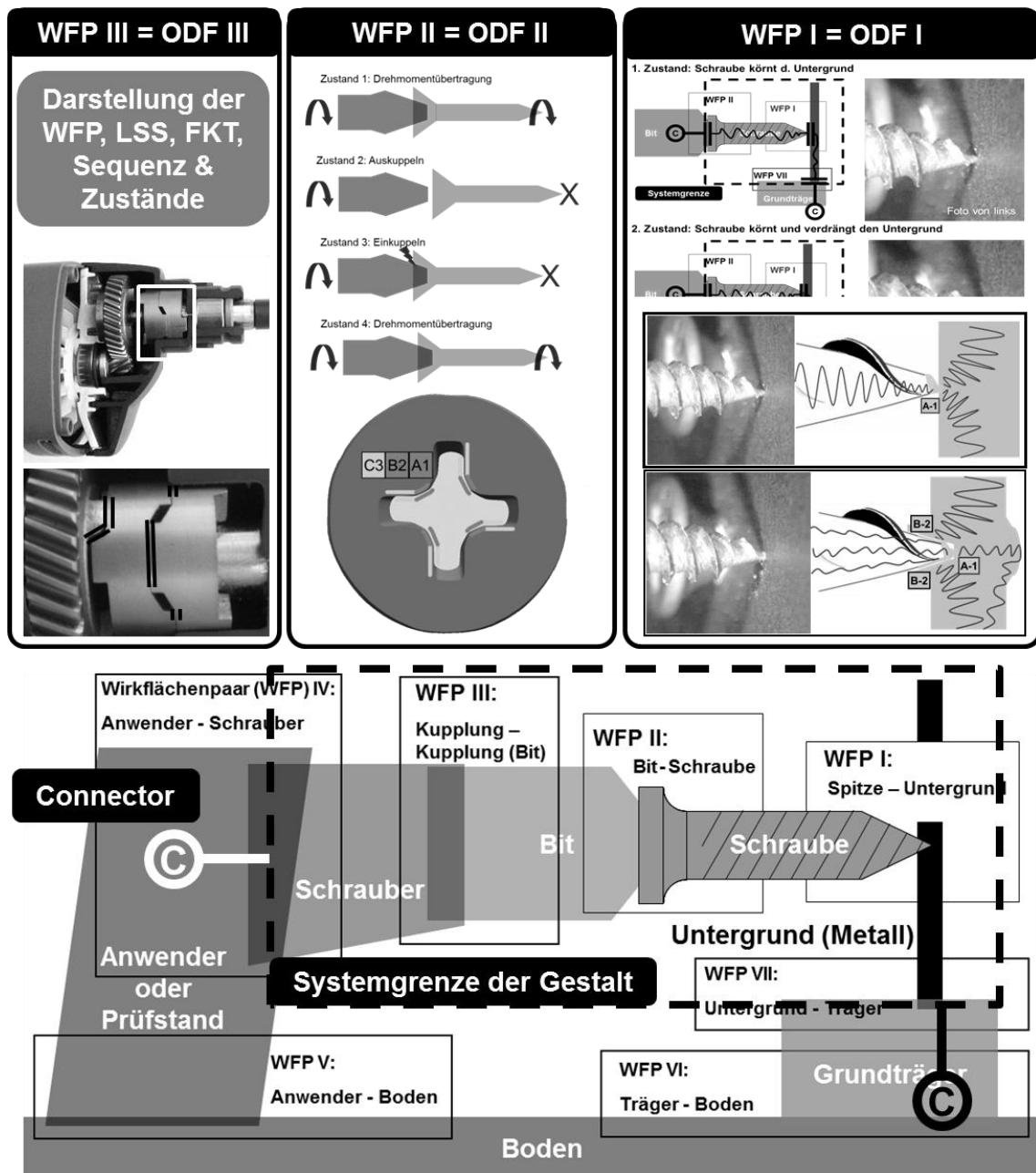


Abbildung 43: System 1 in der Übersichtsdarstellung mit SGG, WFP, Connector und LSS

Merksatz zu den Bestandteilen eines C&C²-Modells

Wenn ein C&C²-Modell eines technischen Systems aufgebaut werden soll, so müssen die relevanten Funktionen mit den relevanten Gestaltfunktions-elementen verknüpft, beschrieben und dargestellt werden. Hierfür muss eine Systemgrenze der Gestalt mittels Connectoren definiert werden, genauso wie eine Systemgrenze der Zeit. Eine Kammstruktur mit Orten der Funktionserfüllung (ODF) hilft komplexere Systeme übersichtlich und detailliert genug darzustellen.

Hierbei ist es sinnvoll für ein C&C²-Modell mehrere Darstellungen zu erarbeiten, wobei nicht jede Darstellung alle obligatorischen Elemente enthalten muss.

5.6 Fazit zu den HMA

Die Beispiele zu den Heuristiken zum Modellaufbau haben gezeigt, wie eng die Heuristiken miteinander verbunden sind. Zusammenfassend können die Heuristiken über folgende Sätze charakterisiert werden. Die Beschreibungen sollen verdeutlichen, wann und wie die Heuristiken beim Modellaufbau helfen können.

- Die Heuristik der Systemgrenze der Gestalt ist eine Hilfestellung, um den Modellaufbau geometrisch zu definieren, bzw. zu begrenzen.
- Die Heuristik der Systemgrenze der Zeit ist eine Hilfestellung, um den Modellaufbau zeitlich zu definieren bzw. zu begrenzen.
- Die Heuristik des ODF ist eine Hilfestellung, um den Modellaufbau auf relevante Gestaltfunktionselemente und deren Wirkungen fokussieren zu können.
- Die Heuristik zur Kammstruktur ist eine Hilfestellung, um umfangreichere Systeme in einem C&C²-Modell erfassen bzw. darstellen zu können.
- Die Heuristik zu den Bestandteilen eines C&C²-Modells ist eine Hilfestellung, um die Elemente des C&C²-Ansatzes gemäß der Definitionen und Grundhypothesen zu nutzen, um ein C&C²-Modell aufzubauen.

6 Heuristiken für die C&C²-Modellbildung (HMB)

Im vorherigen Kapitel wurden Heuristiken definiert, die beschreiben wie ein C&C²-Modell aufgebaut werden kann. In diesem Kapitel werden Heuristiken (siehe Abbildung 44) beschrieben, die helfen können ein C&C²-Modell zu bilden. Bei der Modellbildung werden die Funktionen und Gestaltfunktionselemente im technischen System identifiziert, deren Eigenschaften definiert und im C&C²-Modell abgebildet. Viele der Heuristiken zur Modellbildung knüpfen an die Heuristiken zum Modellaufbau (Kapitel 5) an.

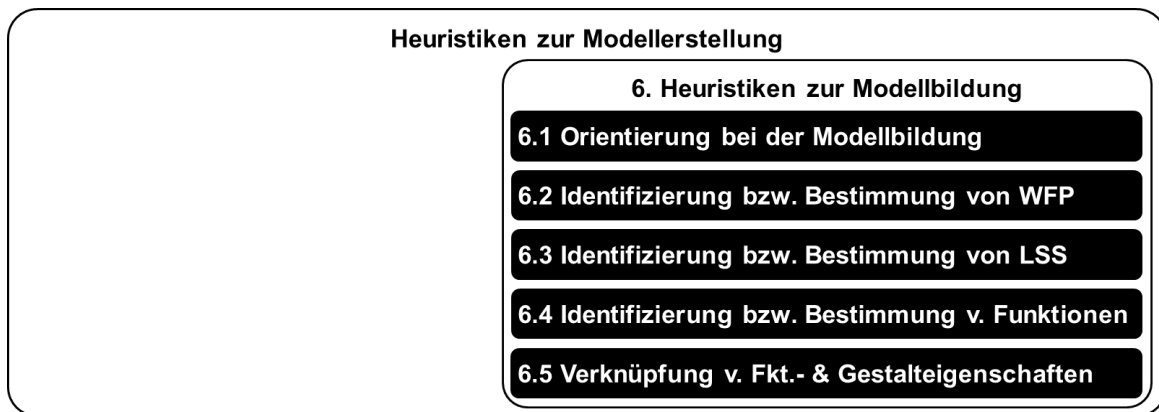


Abbildung 44: Aufbau dieses Kapitels - Heuristiken zur C&C²-Modellbildung (HMB)

6.1 Orientierung bei der Modellbildung

Bei jeder Systemanalyse stellt sich die Frage, welche Teile des Systems zuerst analysiert werden sollten. Hier gilt grundsätzlich, dass die Analyse genau dort beginnen sollte, wo der Anwender den relevanten Teil des Systems vermutet. Als relevant sind sowohl die Funktionen und Gestaltfunktionselemente einzustufen, die der Zielerreichung dienen, als auch die, die diese verhindern, auch „negative“ Funktionen³²³ bzw. Gestaltfunktionselemente genannt. Die Veränderung relevanter Funktionen/Funktionsgestaltelemente bzw. die Eliminierung negativer Funktionen/Funktionsgestaltelemente ist die entscheidende Vorgehensweise, um die Zielsetzungen zu erreichen, also das technische System gemäß der Zielsetzung zu verbessern. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass negative Funktionen nicht

³²³ Vgl. Lindemann 2007

immer „einfach“ eliminiert werden können, da die zur negativen Funktion gehörigen Gestaltfunktionselemente auch Teil zielführender Funktionen sein können.

Der Vorteil beim Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz ist, dass der Anwender in technischen Systemen Funktionen und Bauteile nicht getrennt betrachtet, sondern mittels Gestaltfunktionselementen verknüpfen kann. Das bedeutet, wenn WFP, LSS und Connectoren im technischen System identifiziert werden, können Gestalt und Funktion im C&C²-Modell verknüpft abgebildet werden. So kann von den Funktionen auf die Gestalt und von der Gestalt auf die Funktionen geschlossen werden. Die Identifizierung der Gestaltfunktionselemente erweist sich in Projekten als ein wichtiger Erfolgsfaktor. Erfolgreiche Vorgehensweisen zur Identifikation von WFP, LSS und Funktionen werden in den folgenden Heuristiken beschrieben (siehe Abbildung 45).

Steckbrief zur Heuristik:

Wann: Am Anfang der Analyse eines System oder Teilsystems

Wofür: Um die relevanten Gestaltfunktionselemente und Funktionen des System zu identifizieren und im C&C²-Modell abzubilden

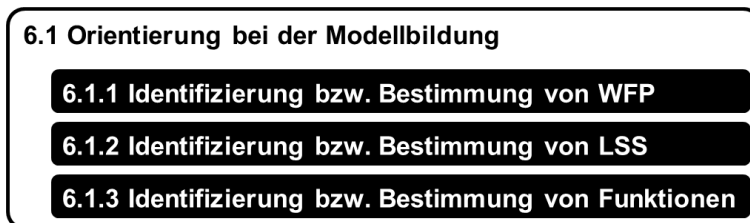


Abbildung 45: Aufbau dieses Kapitels - Inhalt des Kapitels 6.1

Der Anwender hat drei Möglichkeiten mit der Analyse des technischen Systems zu beginnen. Er kann erst nach den WFP im technischen System suchen, um anschließend die dazugehörigen LSS, Connectoren und Funktionen zu bestimmen. Oder erst nach den LSS suchen, um anschließend die dazugehörigen WFP, Connectoren und Funktionen zu bestimmen. Die dritte Möglichkeit ist, erst nach den Funktionen suchen, um anschließend die dazugehörigen WFP, Connectoren und LSS zu bestimmen.

6.1.1 Identifizierung bzw. Bestimmung von WFP

Indem WFP identifiziert werden, kann auf Funktionen und LSS geschlossen werden (siehe Kapitel 6.2).

Die Projekte zeigen, dass es sich bewährt, zuerst die WFP zu identifizieren und darzustellen, da sie meist leichter im technischen System zu erkennen sind. Beispiele sind Verschleißspuren auf Zahnrädern, die auf WFP zwischen den Zahnrädern hinweisen, oder der Berührungspunkt zweier Bauteile. Das erste Beispiel zeigt, dass manchmal im Moment der Betrachtung nur einzelne WF identifiziert werden können. In diesem Fall muss auch das anderen WF des WFP und der Zeitpunkt der Berührung identifiziert werden.

Merksatz zur Identifikation bzw. Bestimmung von WFP

Suche nach WFP in einem als relevant eingestuften Teil des Systems, um eine Analyse zu starten. Ein WFP darf nicht mit der Oberfläche eines Bauteils verwechselt werden.

6.1.2 Identifizierung bzw. Bestimmung von LSS

Indem LSS identifiziert werden, kann auf WFP und Funktion geschlossen werden (siehe Kapitel 6.3).

Es gibt Situationen, in denen es hilfreich sein kann, ausgehend von der LSS die WFP und Funktionen zu bestimmen. Z.B. weist ein Bruch eines Zahnradzahnes auf eine LSS im Bauteil hin, über die mehr Kraft übertragen wurde, als es die Gestalt der LSS an Belastung ertragen kann (Achtung: die LSS ist nicht mit dem Bauteil gleichzusetzen³²⁴). Die LSS ist der Teil des Bauteils, der die Kraft und Information überträgt. Ausgehend von einer versagten LSS können die dazugehörigen WFP, über die die Kraft ein- bzw. ausgeleitet wurde, und die dazugehörigen Funktionen gesucht werden. Oder z.B. durch eine Simulation können hochbeanspruchte LSS sichtbar gemacht werden und anschließend die dafür verantwortlichen WFP bzw. Funktionen identifiziert werden.

Merksatz zur Identifikation bzw. Bestimmung von LSS

Suche nach LSS in einem als relevant eingestuften Teil des Systems, um eine Analyse zu starten. Die LSS darf nicht mit dem Bauteil verwechselt werden.

³²⁴ Z.B. kann in einem Bauteil sehr viel Reststruktur vorhanden sein, die keinen positiven Einfluß auf die Kraftübertragung hat

6.1.3 Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen

Indem Funktionen identifiziert werden, kann auf WFP und LSS geschlossen werden (siehe Kapitel 6.4).

Funktionen können durch Beobachtung des Systems beschrieben werden. Z.B. kann durch die Bestimmung der Ein- und Ausgangsdrehzahl bei einem Getriebe die Funktion „Drehzahl wandeln“ identifiziert werden. Auch eine Fehlfunktion³²⁵ (z.B. ein Getriebe erzeugt sehr viel Wärme) kann ein Startpunkt sein, um die dazugehörigen WFP und LSS zu suchen.

Merksatz zur Identifikation bzw. Bestimmung von Funktionen

Suche nach Funktionen in einem als relevant eingestuften Teil des Systems, um eine Analyse zu starten.

6.1.4 Anmerkung

Wenn es nicht möglich ist, innerhalb des definierten Betrachtungsraumes relevante Funktionen oder Gestaltfunktionselemente zu identifizieren, hat der Anwender drei mögliche Vorgehensweisen. Eine dieser drei Vorgehensweisen hat sich in den Projekten immer als zielführend erwiesen:

1. Erhöhe die Detaillierung, um weitere Funktionen und Gestaltfunktionselemente innerhalb der Systemgrenze zu identifizieren.
2. Verringere die Detaillierung, um Funktionen und Gestaltfunktionselemente von außerhalb der bisherigen Systemgrenze mit einzubeziehen.
3. Definiere einen neuen Betrachtungsraum, in dem relevante Funktionen und Gestaltfunktionselemente vermutet werden.

Um von einer Funktion mit ihren Gestaltfunktionselementen auf die nächsten relevanten Funktionen oder, und Gestaltfunktionselemente zu schließen, kann in mechanischen Systemen dem Kraftfluss gefolgt werden.³²⁶

³²⁵ Fehlfunktion im Sinne einer Funktion, die ungewollt ist, also für die Zielerreichung als kontraproduktiv eingestuft wird, z.B. das Bitspringen

³²⁶ Vgl. Alink 2010 auf S. 142ff, Pahl/Beitz et al 2006 auf S. 354ff und Diskussion zwischen Autor und Feldhusen am 23.11.2010

Die drei Heuristiken zur Orientierung in der Modellbildung werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

6.2 Identifizierung bzw. Bestimmung von WFP

In diesem Kapitel werden Heuristiken beschrieben, die helfen können WFP im technischen System zu identifizieren (siehe Abbildung 46). Ein Entwickler in einem der Projekte beschreibt die Identifizierung des entscheidenden WFP als den Schlüssel zu einer erfolgreichen Systemanalyse.³²⁷ Die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, dass die Suche nach den relevanten WFP einen entscheidenden Bestandteil der Systemanalyse darstellt. Wichtig bei der Bestimmung von WFP ist, die verschiedenen Zustände des Systems zu beachten. Die wenigsten WFP existieren in allen Zuständen.³²⁸

Steckbrief zur Heuristik:

Wann: *Wenn WFP im technischen System identifiziert werden sollen*

Wofür: *Um mit der Identifizierung von WFP auf die restlichen Gestaltfunktions-elemente, Connectoren und Funktionen zu schließen und so Systemverständnis aufbauen zu können*

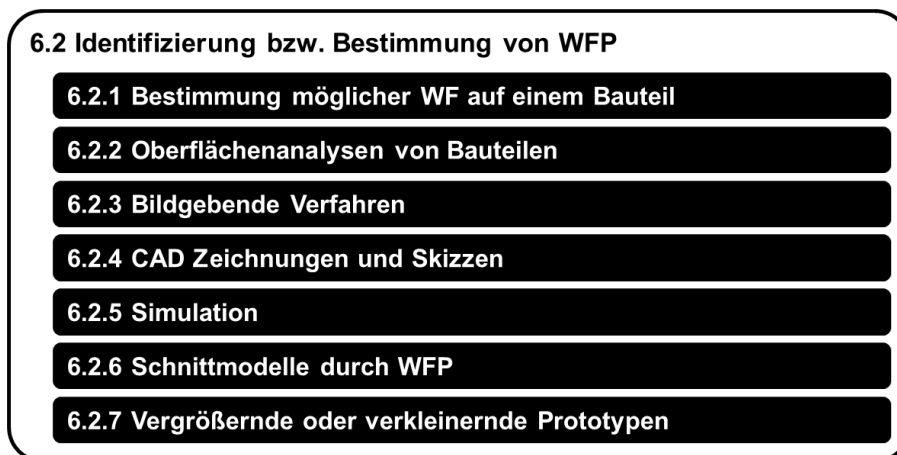


Abbildung 46: Aufbau des Kapitels

³²⁷ Siehe Kapitel 7.4

³²⁸ Siehe Kapitel 5.2

6.2.1 Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil

Die Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil hilft bei der Differenzierung und Benennung der WF und unterstützt WFP zu identifizieren.

Für die Bestimmung von WFP kann es zielführend sein, auf dem Bauteil erst mögliche WF zu definieren. Dies hilft besonders, wenn die WFP nicht direkt zu sehen sind, oder wie im Beispiel der Schraube (Beispielsystem 1), die WF des Untergrundes erst im Moment der Funktionserfüllung entstehen (siehe Abbildung 47). Die Benennung möglicher WF hilft, die tatsächlich existierenden WFP zu identifizieren. So ist z.B. in Gruppendiskussionen klar, von welcher Fläche in der Analyse des Systems gesprochen wird.

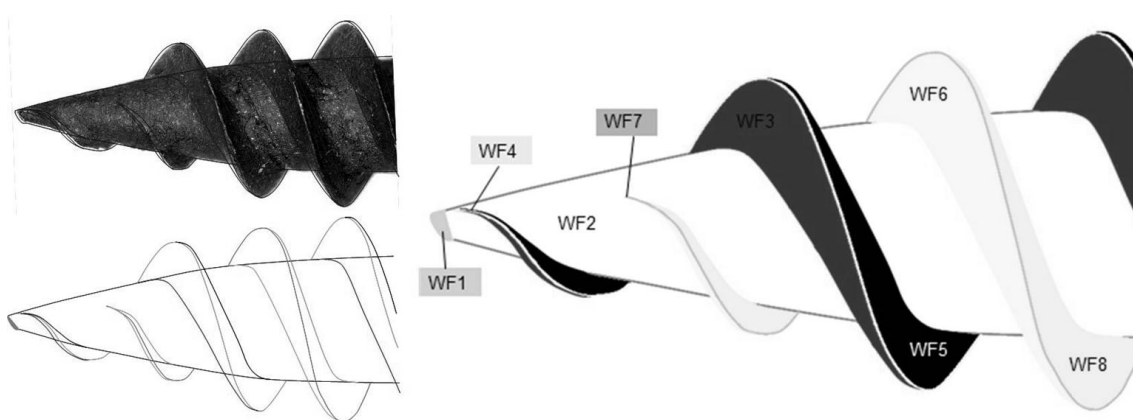
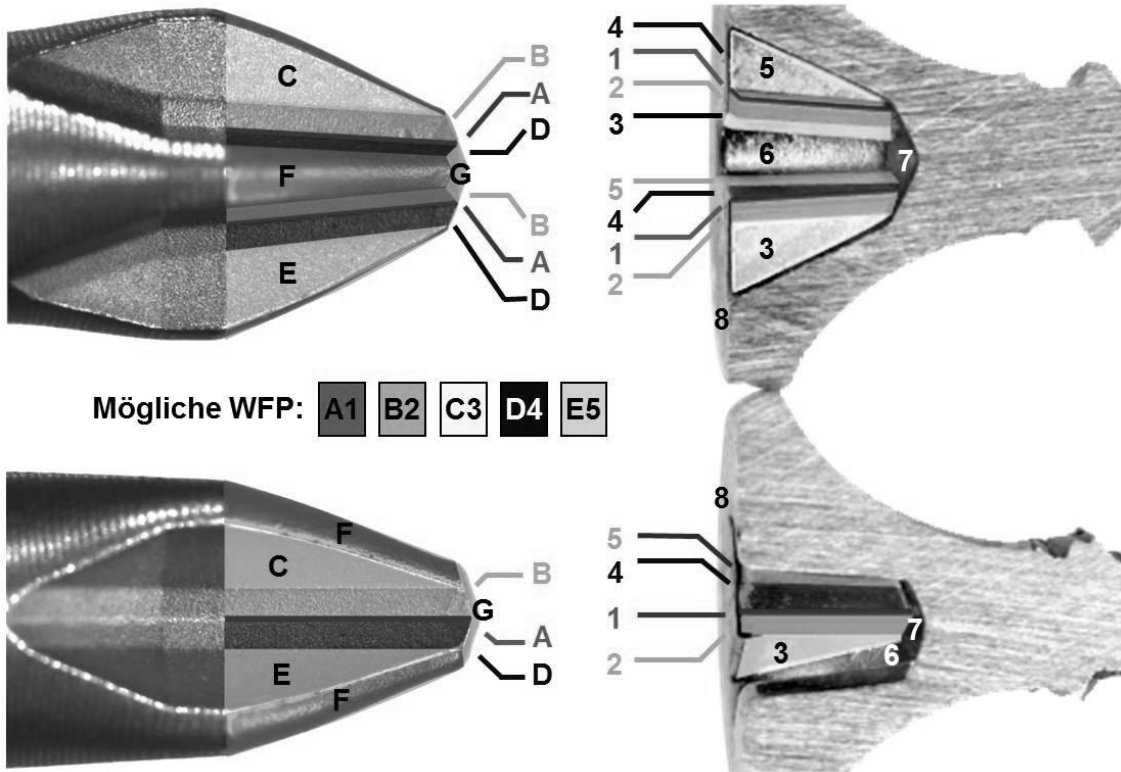


Abbildung 47: Bestimmung möglicher WF auf einer Schraube vor Analyse des Einschraubprozesses

Im Projekt zum Beispielsystem 1, werden sowohl auf der Schraubenspitze, als auch auf dem Bit bzw. Recess mögliche WF definiert, um so in späteren Analysen die tatsächlich existierenden WF bzw. WFP zu definieren. Z.B. wird so die Benennung der WFP zwischen Bit und Recess stark vereinfacht (siehe Abbildung 48). Laut der Patentschrift zum Phillips Bit³²⁹ ist vor allem WFP A1 für die Übertragung des Drehmoments verantwortlich.

³²⁹ Vgl. Phillips 1936

Darstellung möglicher WF und WFP auf realen Bauteilen



Darstellung möglicher WF auf Zeichnungsmodellen

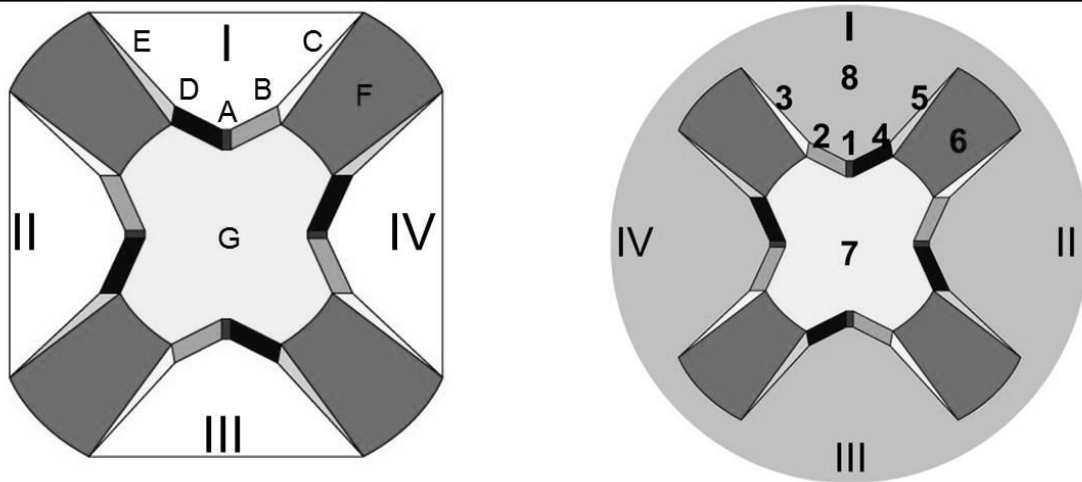


Abbildung 48: Bestimmung der möglichen WF auf dem Bit und dem Recess der Schraube³³⁰

Ein weiteres Beispiel für diese Vorgehensweise ist das Projekt zur Weiterentwicklung eines mechanischen Dübels (Beispielsystem 3). Obwohl die teilnehmenden Entwickler

³³⁰ Vgl. Schwerdtfeger 2007

sich schon seit Jahren mit dem Produkt auseinander gesetzt haben, war laut der Teammitglieder die Definition möglicher WF ein hilfreicher Schritt, um im Team die tatsächlich existierenden WFP zu definieren und entsprechenden LSS bzw. Funktionen zuzuordnen (siehe Abbildung 49).

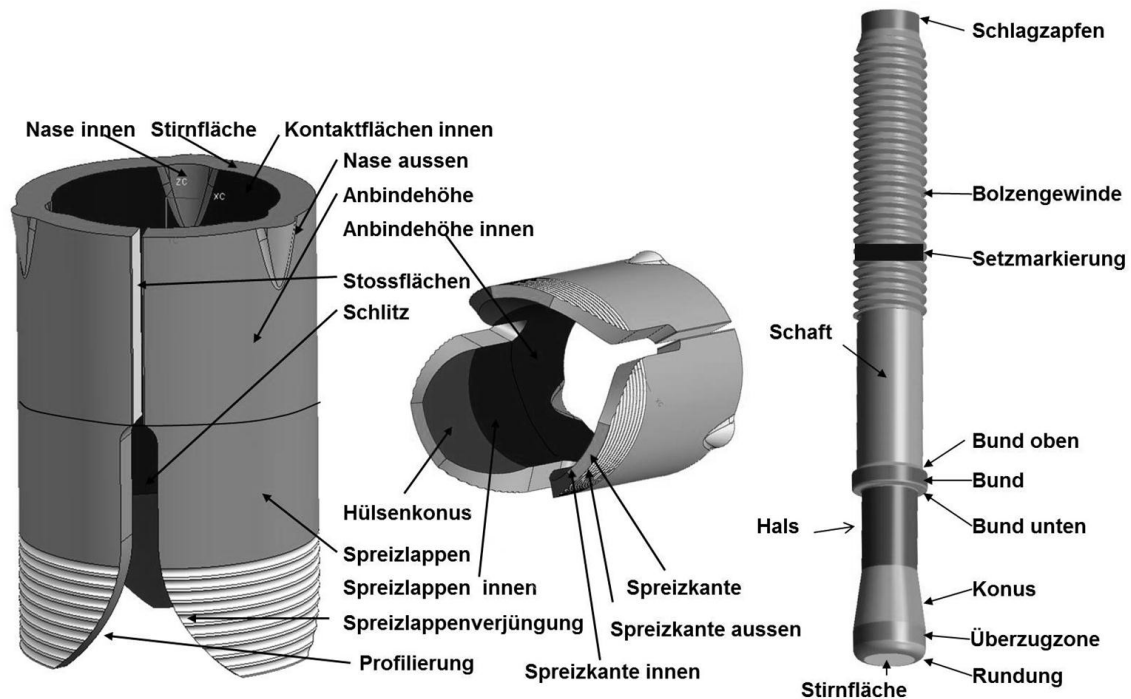


Abbildung 49: gemeinsame Definition der potentiellen WF auf einem mechanischen Dübel

Merksatz zur Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil zur Bestimmung von WFP

Um WFP zu identifizieren, formuliere erst potentielle WF auf dem Bauteil. Das erleichtert die klare Zuweisung zweier WF zu einem WFP. Schließe von den WFP auf die LSS und Funktionen.

Anmerkung: Bei dieser Vorgehensweise ist zu beachten, dass Funktionen nicht mit potentiellen, sondern nur mit real vorkommenden WFP definiert werden können. Oft ist nur ein Teil der potentiellen WF auch tatsächlich existierendes WF eines WFP. Die potentiellen WF die nicht zu WFP werden sind Begrenzungsflächen.

6.2.2 Oberflächenanalysen von Bauteilen

Die Oberflächenanalyse ist meist eine einfache und schnelle Vorgehensweise, um WFP zu identifizieren.

Berührungspunkte der Bauteile: Eine mögliche Vorgehensweise um WFP zu identifizieren, ist die Suche nach Berührungspunkten zweier Oberflächen. Aber nicht jeder Berührungspunkt zweier Oberflächen ist ein WFP. Ein WFP kann nur existieren, wenn es Teil einer relevanten Funktion ist. Ein Beispiel ist in Abbildung 50 dargestellt (Beispielsystem 2). In diesem Fall sollen die WFP zwischen den Schrauben und dem Magazin im Gerät identifiziert werden. Dazu werden die Schrauben in das Gerät eingelegt und nach den Berührungspunkten zwischen den Bauteilen gesucht und validiert, ob diese Teil einer Funktion sind. Nur dann handelt es sich bei den Berührungspunkten auch um WFP.



Abbildung 50: Identifizierung der WFP zwischen Schraube und Magazin

Verschleißspuren sind ein Beweis, dass ein Bauteil mit einem festen, flüssigen oder gasförmigen Körper in Kontakt war. Verschleiß kann auf Beschichtungen (siehe Beispiel in Abbildung 52) und Grundmaterialien (siehe Beispiel in Abbildung 51) beobachtet werden. Aus dem Verschleißbild können oft Relativbewegung, wirkende Kräfte und Dauer des Kontaktes bestimmt werden. Experten können anhand von Verschleißbildern z.B. auch auf die Gestalteeigenschaften des WF Rückschlüsse ziehen oder beurteilen, z.B. ob sich im WFP Schmierstoffe befinden (z.B. Zahnräder in einem Getriebe).

In Abbildung 51 sind Verschleißspuren (Pfeile) im Magazin des Gerätes zu erkennen. Die Analyse der Verschleißspuren lässt z.B. Rückschlüsse zu, wo die Schraube im Magazin geführt wird. Z.B. weisen die Verschleißspuren in der Führungsschiene des Kopfes darauf hin, dass die WF der Schienen ein Verkappen der Schraube verhindern (mittlere Abbildung).

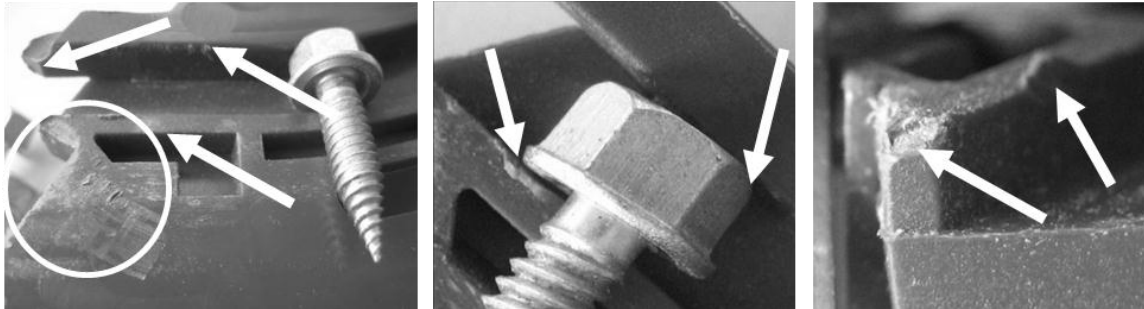


Abbildung 51: Identifizierung der WF bzw. WFP zwischen Schraube und der Führungsschiene des Magazins in Beispielsystem 2 anhand der Verschleißspuren (weiß markiert)

Aus den Abtragungen der Beschichtung (siehe Pfeile in Abbildung 52) lassen sich z.B. Rückschlüsse ziehen, welche Oberflächen der Schraube WFP zum Untergrund bilden (Beispielsystem 1). Um die WFP zu beschreiben, müssen auch die WF des Untergrundes definiert werden.

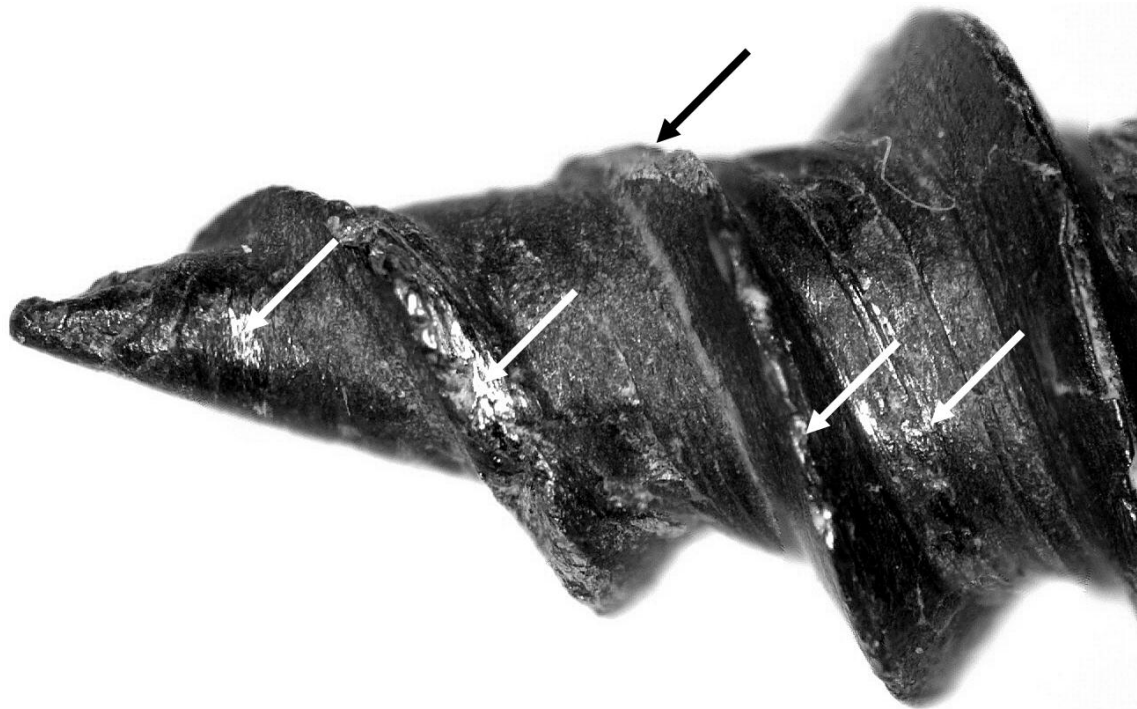


Abbildung 52: Verschleiß der Oberfläche als Nachweis für ein WFP zwischen Schraube und Untergrund

Die Bilder in Abbildung 53 zeigen Verschleißbilder auf verschiedenartigen Phillips Bits. Mit jedem dieser Bits wurden 200 Schrauben gesetzt. Aus den dargestellten Fotos können die WF auf dem Bit bestimmt werden. Von den WF auf dem Bit kann wiederum auf die WFP zwischen Bit und Recess geschlossen werden. Der Verschleiß lässt den Schluss zu, dass die Funktion „Drehmoment übertragen“ stattgefunden hat. Die Art, wie die WF verschlissen sind, zeigt dass das Drehmoment von mehr WFP übertragen wird, als es im Patent definiert ist. Das Drehmoment wird nicht nur über WFP A1 übertragen (laut Patent), sondern auch über die WFP B2 und C3 (siehe Abbildung 54).

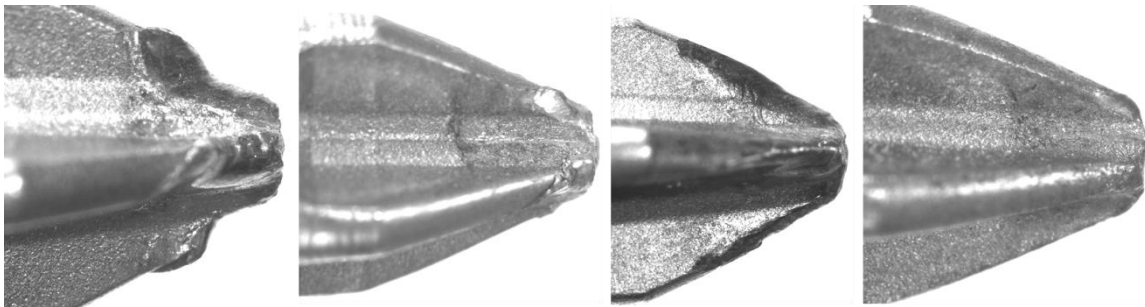


Abbildung 53: Verschleiß unterschiedlicher Bits nach 200 Setzungen

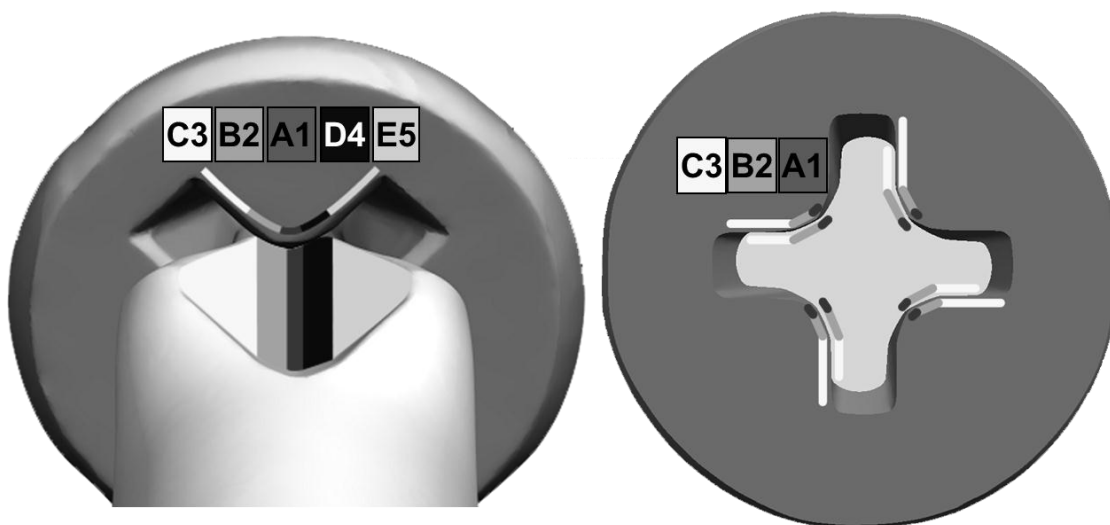


Abbildung 54: WFP zwischen Recess und Bits, rechts: WFP, die an der Drehmomentübertragung beteiligt sind³³¹

Sichtbarmachung der Berührungspunkte von Oberflächen durch Oberflächenbehandlung (z.B. Markierungsfarbe): Sollten keine Verschleißspuren zu erkennen sein, kann dadurch Abhilfe geschaffen werden, indem die Oberfläche der

³³¹ Vgl. Schwerdtfeger 2007

Bauteile so behandelt wird, dass die Berührungsstellen zum anderen Bauteil sichtbar werden. So können z.B. die WF auf der schwarzen Schraube mit einer weißen Farbe sichtbar gemacht werden, da diese bei Berührung mit dem Untergrund abgetragen wird. Anschließend kann von den WF auf der Schraube auf die WF im Untergrund und damit auf die WFP zwischen Schraube und Untergrund geschlossen werden (siehe Abbildung 55). Und von den WFP kann auf die LSS und die Funktionen geschlossen werden.

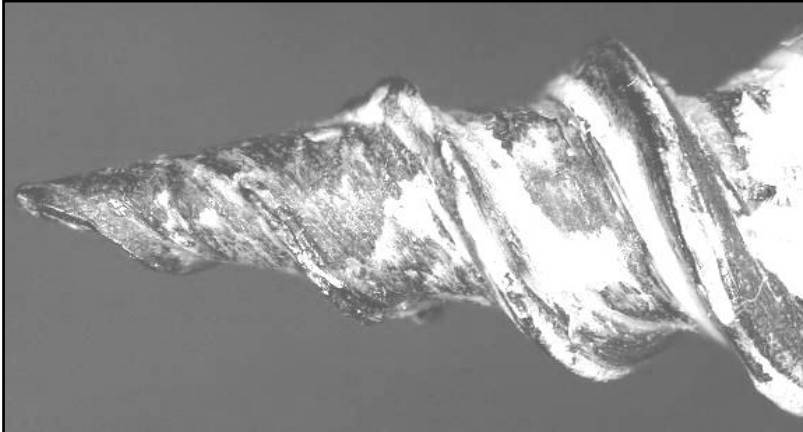


Abbildung 55: Sichtbarmachung der WF einer Schraube beim Einschraubvorgang durch weiße Farbe – WF sind dort, wo die weiße Farbe abgetragen wurde

Merksatz zu Oberflächenanalysen von Bauteilen zur Bestimmung von WFP

Um WFP zu identifizieren, analysiere die Oberflächen der Bauteile. Wo sich zwei Bauteile berühren, kann ein WFP existieren. Analysiere auch Oberflächen, die einen Verschleiß aufweisen, hier kann ein WFP existieren. Oder behandle die Oberfläche des Bauteils, um die Berührungsfläche sichtbar zu machen. Schließe von den WFP auf die LSS und Funktionen.

6.2.3 Bildgebende Verfahren

Wenn WFP mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen sind, können bildgebende Verfahren helfen, WFP zu identifizieren.

Fotos eignen sich hervorragend, um WFP sichtbar zu machen, zu dokumentieren und dauerhaft für Analysen bereitzustellen. Mit einem Foto kann ein WFP beliebig oft betrachtet und analysiert werden: Auf Fotos können auch WFP eingezeichnet werden. Durch starke Vergrößerungen können WFP sichtbar gemacht werden, die mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen sind (siehe Abbildung 56).

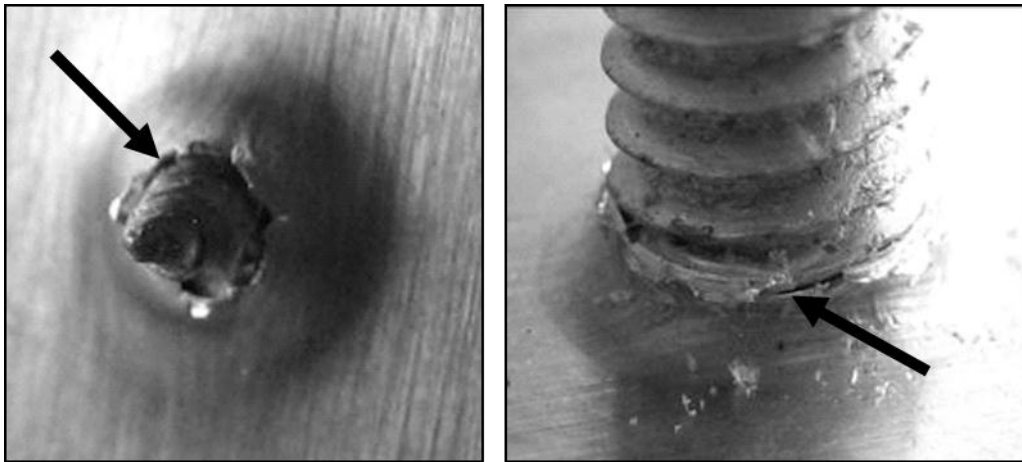


Abbildung 56: Foto der WFP zwischen Schraubenspitze und Untergrund

Für **Videoaufnahmen** gilt dasselbe. Zusätzlich können hier Zeitspannen erfasst werden, in denen die WFP existieren. Durch eine starke Verlangsamung oder Beschleunigung des Videos können WFP sichtbar gemacht werden, die dem bloßem Auge verborgen bleiben. Ein Beispiel hierzu sind die Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen, um die Sequenz des ODF I in Beispielsystem 1 sichtbar zu machen und zu definieren (siehe Abbildung 57).

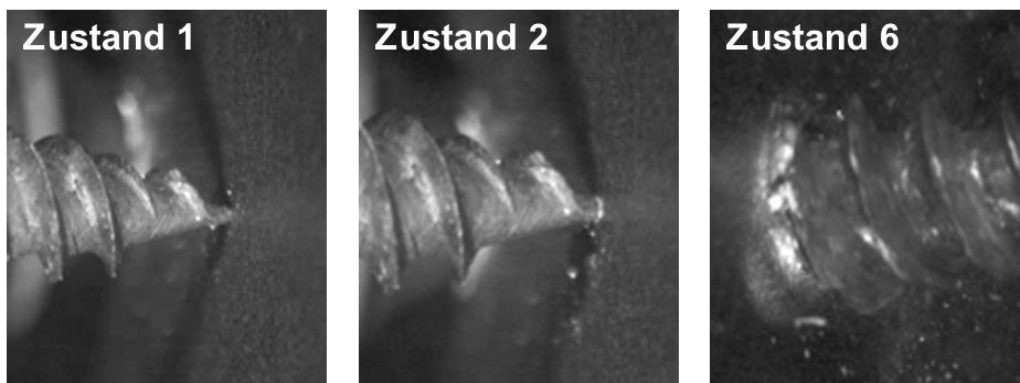


Abbildung 57: Bilder aus Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen des Beispielsystems 1 zwischen Schraube und Untergrund

Materialdurchdringende, bildgebende Verfahren: Z.B. mit Röntgenaufnahmen, Magnetspintomographie und Ultraschall ist es möglich, für das menschliche Auge „unsichtbare“ WFP darzustellen, auch ohne das System auseinander zu bauen oder zu zerstören. Im Beispielsystems 1 kann mit Hilfe von Röntgenaufnahmen sichtbar gemacht werden, welche WFP zwischen Bit und Recess existieren und die Anpresskraft bzw. das Drehmoment übertragen (Abbildung 48). Es ist deutlich zu

erkennen, dass WFP A1 existiert, wogegen sich die restlichen WF des Bits und des Recess sich nicht berühren und daher kein WFP bilden (siehe Abbildung 58).

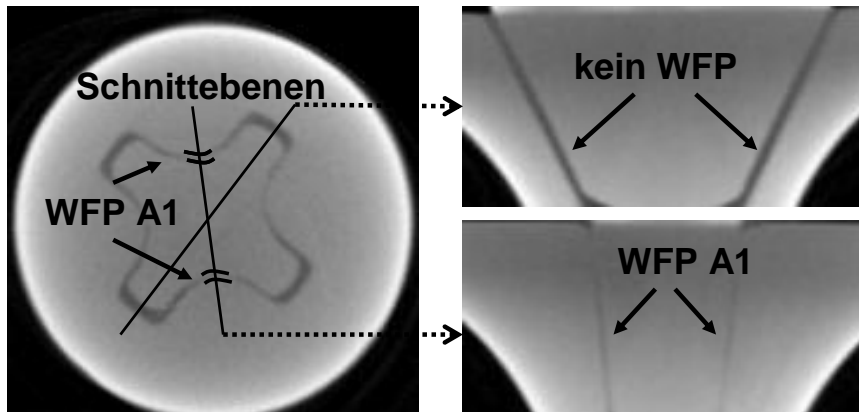


Abbildung 58: Identifikation des WFP A1 zwischen Bit und Recess mittels Röntgenaufnahmen

Merksatz zu bildgebenden Verfahren zur Bestimmung von WFP

Um WFP zu identifizieren nütze bildgebende Verfahren wie z.B. Fotos, Videoaufnahmen, Röntgenstrahlen, Ultraschall und Magnetspintomographie. Schließe von den WFP auf die LSS und Funktionen.

6.2.4 CAD Zeichnungen und Skizzen

Eine Hilfe zur Identifizierung von WFP sind CAD Modelle. CAD Modelle, in denen die Bauteile zusammenmontiert dargestellt sind, können Rückschlüsse über die Berührungspunkte zwischen den Bauteilen geben. Von den Berührungspunkten kann auf WFP geschlossen werden, wobei nicht jeder Berührungspunkt ein WFP sein muss. Bei WFP, die anhand von CAD Modellen ermittelt werden, muss validiert werden, inwiefern das WFP auch im realen System existiert. Um die CAD Modelle möglichst realitätsnah zu definieren, können sie anhand von Vermessungsdaten realer Bauteile definiert werden. Mit Hilfe von CAD Bauteilen kann mit niedrigem Aufwand analysiert werden, wie sich Gestaltvariationen der Bauteile auf die Anzahl und Eigenschaften der WFP auswirken.

In Abbildung 59 ist dargestellt, wie CAD Modelle, die auf der Vermessung realer Bauteile beruhen, genutzt werden, um die WFP zwischen Bit und Recess in Beispielsystem 1 zu bestimmen. Wie auch auf den Röntgenaufnahmen in Abbildung 58 zu erkennen ist, existiert nur das WFP A1 zwischen Bit und Recess, um das Drehmoment und die Anpresskraft zu übertragen.

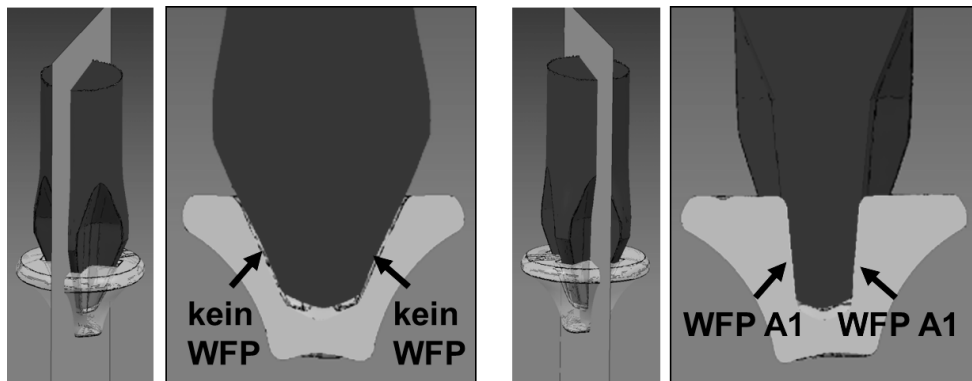


Abbildung 59: Identifizierung des WFP A1 zwischen Bit und Recess mittels CAD Modellen³³²

Auch das CAD Modell in Abbildung 60 basiert auf der Vermessung realer Bauteile. Dafür wird die Schraube ein- und wieder ausgeschraubt. Anschließend werden die Bauteile einzeln vermessen und im CAD Modell wieder zusammengefügt. Auf diese Weise kann aus dem Modell abgeleitet werden, wo sich WFP zwischen der Schraube, der Dichtscheibe und den Blechen bilden. Ziel ist, die WFP einer Schraube mit Dichtscheibe zu identifizieren, die die Klemmung der beiden Bleche herstellen.

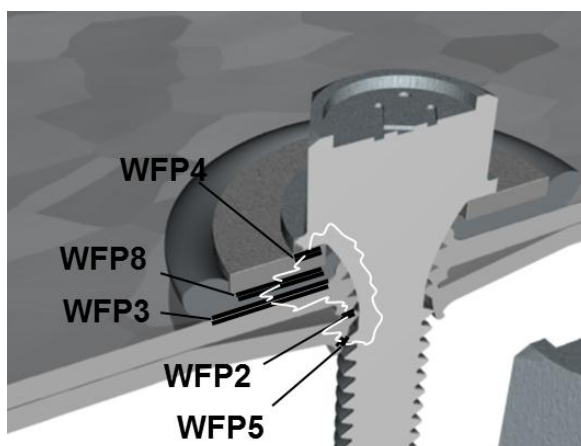


Abbildung 60: WFP (schwarz) zw. Schraube, Dichtscheibe und Untergrund (weiß → LSS)³³³

Merksatz zu CAD Zeichnungen und Skizzen zur Bestimmung von WFP

Nütze CAD Modelle um WFP zu identifizieren und schließe von diesen auf LSS und Funktionen. Hierfür können CAD Modelle aus Zeichnungen oder aus Vermessungen realer Bauteile verwendet werden.

³³² Vgl. Schwerdtfeger 2007

³³³ Vgl. Baudy 2010

6.2.5 Simulationen

Mit Hilfe von Simulationsprogrammen kann die Entstehung von WFP nachgebildet werden. Dies kann vor allem bei Systemen helfen, in die nicht eingesehen werden kann, wie z.B. die Spitze einer selbstpenetrierenden Schraube (Beispielsystem 1) im Untergrund (siehe Abbildung 61).

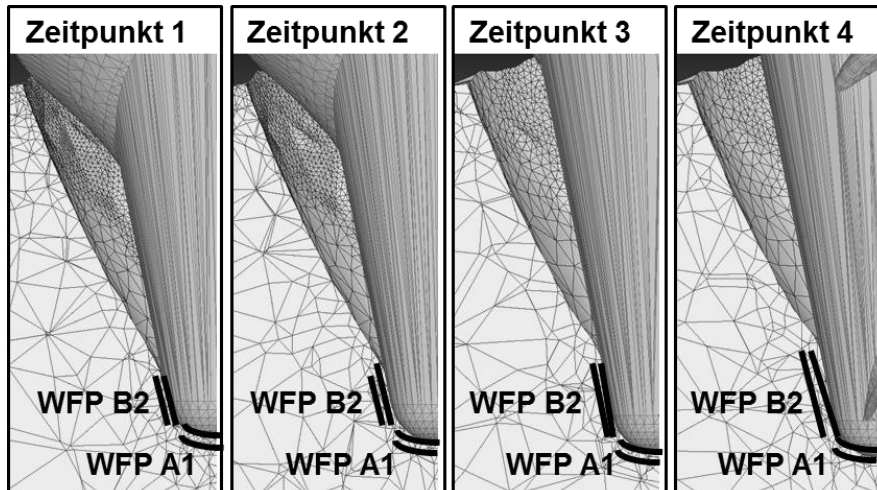


Abbildung 61: Simulation des Eindringprozesses zur Identifikation der WFP zwischen Schraube und Untergrund

Merksatz zu Simulationen zur Bestimmung von WFP

Um WFP zu identifizieren, nütze Simulationsprogramme, die die Systemoperation nachbilden und schließe von den WFP auf die LSS und Funktionen.

6.2.6 Schnittmodelle durch WFP

Es kann zielführend sein Bauteile zu zerstören, so dass eine Schnittebene durch die WFP entsteht. Beispiele hierfür sind Schnittmodelle und Schliffe. Schliffe eignen sich für kleinere Systeme mit kleineren WFP, wie z.B. einer Schraube, Nägel, Dübel, Lager, etc. Abbildung 62 zeigt einen Schliff, der die WFP zwischen Schraube und Untergrund sichtbar macht.

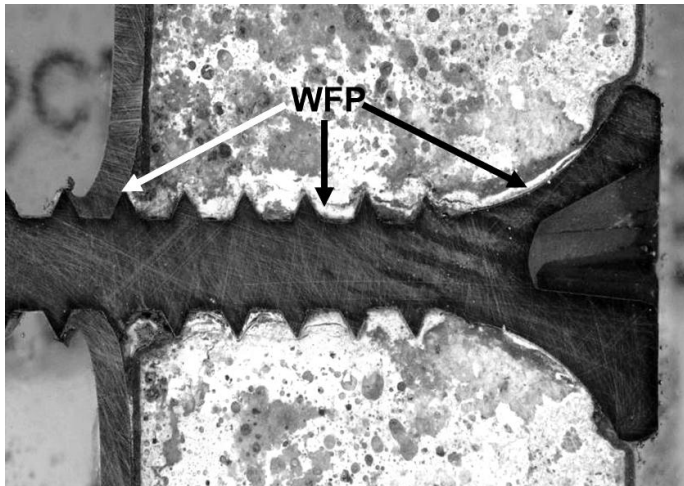


Abbildung 62: Schliff einer Schraube im Untergrund

Abbildung 63 zeigt Schliffe durch den ODF II in Beispielsystem 1 (zwischen Bit und Recess). Wie vorher schon bei den Röntgen und CAD Darstellung zu sehen, bildet sich zwischen Bit und Recess nur das WFP A1 (rechte Abbildung).

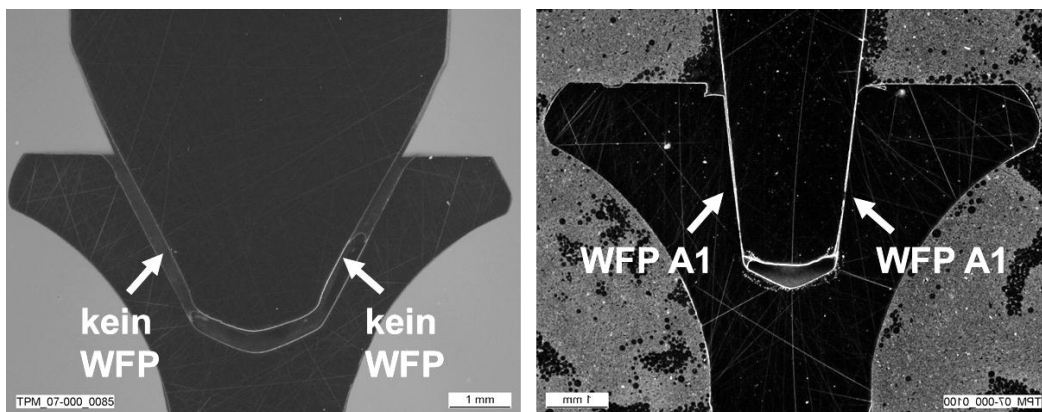


Abbildung 63: Schliff durch den ODF II, um herauszufinden, welches WFP hier gebildet wird

Schnittmodelle eignen sich für mittelgroße bis große Gegenstände, wie z.B. einem Bohrhammer oder einem Auto. In Abbildung 64 ist ein Schnittmodell eines Porsches zu sehen: hier ist z.B. das WFP zwischen Heckfenster und Karosserie zu erkennen.



Abbildung 64: Schnittmodell eines Porsche auf der North American International Auto Show, Detroit, 2006

Merksatz zu Schnittmodellen zur Bestimmung von WFP

Um WFP zu identifizieren, nutze Schnittmodelle und Schlitze des technischen Systems. SchlieÙe von den WFP auf die LSS und Funktionen.

6.2.7 Vergrößernde oder verkleinernde Prototypen

Bei sehr kleinen oder sehr großen Systemen kann es hilfreich sein, das System durch Prototypen (z.B. Methoden des Rapid Prototyping) besser erfassbar zu machen.

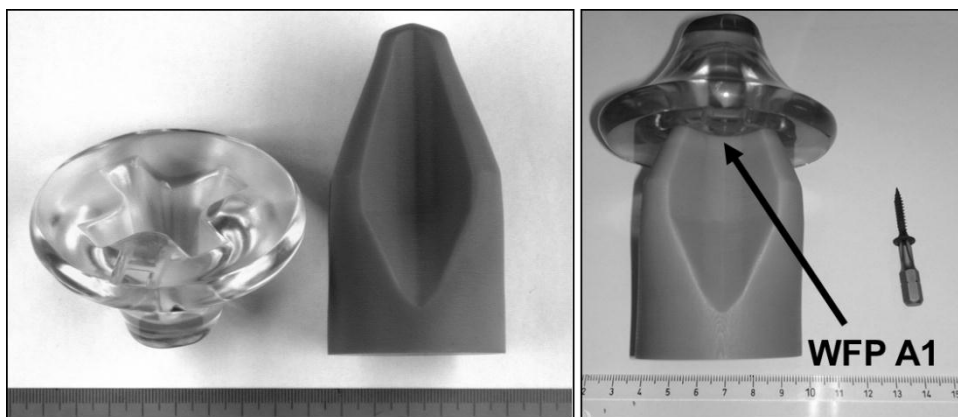


Abbildung 65: 10-fach vergrößertes Rapid Prototyp Modell des Bits und des Recess

In Abbildung 65 sind 10-fach vergrößerte Prototypen des Bits und des Recess zu sehen (Beispielsystem 1). Diese Prototypen basieren auf einer Vermessung realer Bauteile. Damit entspricht die Geometrie der Prototypen denen der realen Bauteile, nur vergrößert. Auf diese Weise kann mit bloßen Auge das WFP A1 als das WFP identifiziert werden, dass sich zwischen Bit und Recess bildet und die Anpresskraft und das Drehmoment überträgt.

Merksatz zu vergrößernden oder verkleinernden Prototypen zur Bestimmung von WFP

Um WFP zu identifizieren, erstelle vergrößernde oder verkleinernde Prototypen und schließe von den WFP auf die LSS und Funktionen.

6.3 Identifizierung bzw. Bestimmung von LSS

Folgende Heuristiken haben sich zur Identifizierung von LSS als erfolgreich erwiesen (siehe Abbildung 66).

Steckbrief zur Heuristik:

Wann: *Wenn LSS im technischen System identifiziert werden sollen*

Wofür: *Um mit der Identifizierung von LSS auf die restlichen Gestaltungselemente, Connectoren und Funktionen zu schließen und so Systemverständnis aufbauen zu können*

6.3 Identifizierung bzw. Bestimmung von LSS

6.3.1 Versagensstellen

6.3.2 Simulationen

6.3.3 Kraft- und Spannungs-induzierende Materialien

Abbildung 66: Aufbau dieses Kapitels

6.3.1 Versagensstellen

Wenn Bauteile versagen, z.B. brechen, sich verformen, reißen, etc., können daraus LSS in Bauteilen identifiziert werden. Die Versagensart, der Ort und der Zeitpunkt des Versagens der LSS kann eine Hilfestellung sein, um die Funktionen und die WFP zu definieren, die zu dem Versagen der LSS geführt haben. Bei dem Beispiel der Schraube (siehe Abbildung 67) weisen die abgescherten Gewindegänge (versagte

LSS) darauf hin, dass die Funktion „Kraft in Richtung X übertragen“ stattfindet. Zu dieser Funktion können die Kraftein- und Kraftausleitungspunkte, sprich die WFP gesucht werden. Auch die plastisch deformierte Schraubenspitze in Abbildung 67 weist auf ein Versagen der LSS hin.



Abbildung 67: Versagensbild der LSS (Gewindes und Schraubenspitze) weist auf mindestens ein WFP im Einschraubprozess hin

Das Beispiel in Abbildung 68 zeigt, dass es nicht immer einfach ist, zwischen Verschleiß der WFP und Versagen der LSS zu unterscheiden. Die abgebildeten Fotos zeigen Löcher im Untergrund, die erfolglose Setzungen einer selbstpenetrierenden Schraube hinterlassen. Von den Löchern im Untergrund kann auf die versagten LSS der Schraube geschlossen werden. Die rechte Schraube in Abbildung 67 hinterlässt eher ein Loch, wie es im linken Bild der Abbildung 68 zu sehen ist. Die mittlere Schraube aus Abbildung 67 erzeugt eher ein Loch, wie es im rechten Bild der Abbildung 68 zu sehen ist. Somit kann auch indirekt auf das Versagen von LSS geschlossen werden.

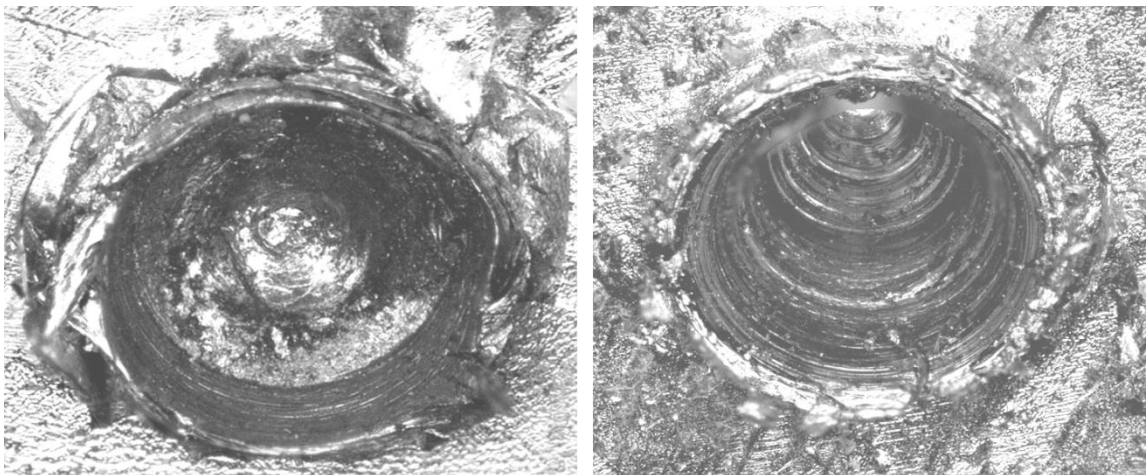


Abbildung 68: Die WF im Untergrund als Hinweis, welche LSS der Schraube versagt haben

Abbildung 69 zeigt eine Kombination von Heuristiken. In diesem Beispiel wird ein Schliff durch die Schraubenköpfe dazu verwendet, sowohl die WFP zwischen

Schraube und Untergrund zu definieren, als auch die Versagensstelle zu identifizieren. Aus diesem Versagensbild kann z.B. der Rückschluss gezogen werden, dass eine Funktion stattgefunden hat, in der Zug- oder Scherspannungen in der Schraube zu übertragen sind und diese die Versagensursache sind.

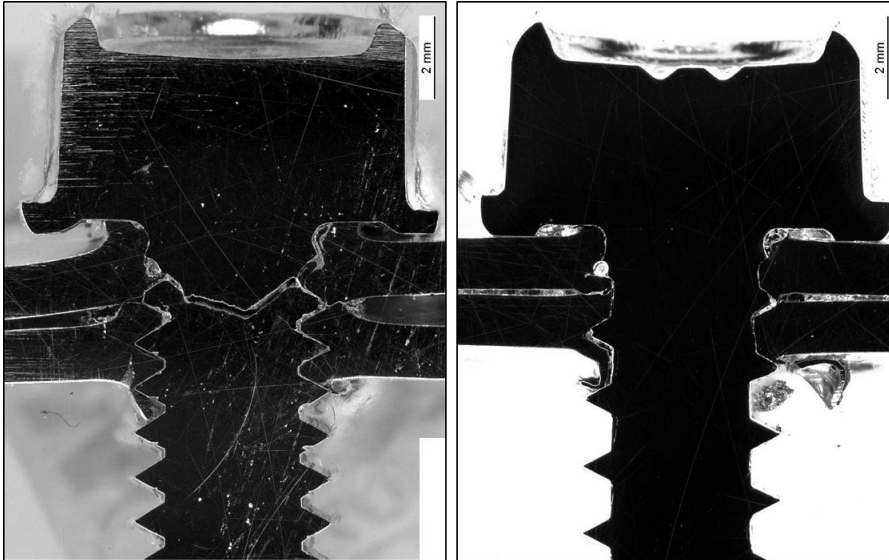


Abbildung 69: versagte LSS (linkes Bild) und WFP zwischen Untergrund und Schraubenkopf (rechtes Bild)

Merksatz zu Versagensstellen zur Bestimmung von LSS

Um LSS³³⁴ zu identifizieren, suche bei versagenden Bauteilen nach der Versagensstelle im Bauteil. Schließe von der Versagensstelle auf die LSS im technischen System und von den LSS wiederum auf die WFP und Funktionen.

Anmerkung: Es ist zu beachten, dass Bauteile nicht mit LSS gleich zu setzten sind.

6.3.2 Simulationen

Durch Simulationsprogramme können Kraftflüsse in Bauteilen und damit der Verlauf der LSS bestimmt werden. Mit Simulationen kann aufgezeigt werden, ob die LSS Zug-, Druck-, Torsions- und Scherspannungen überträgt. Ein Beispiel ist in Abbildung 70 dargestellt. Die Simulation hilft zu bestimmen, ob das Material der Schraubenspitze den Belastungen eines schrägen Einschraubvorganges standhalten

³³⁴ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 51 - Anmerkung: zu beachten ist, dass Bauteile nicht mit LSS gleich zu setzten sind

kann. Durch die Simulation können die Belastungen im technischen System dargestellt und das technische System angepasst werden.

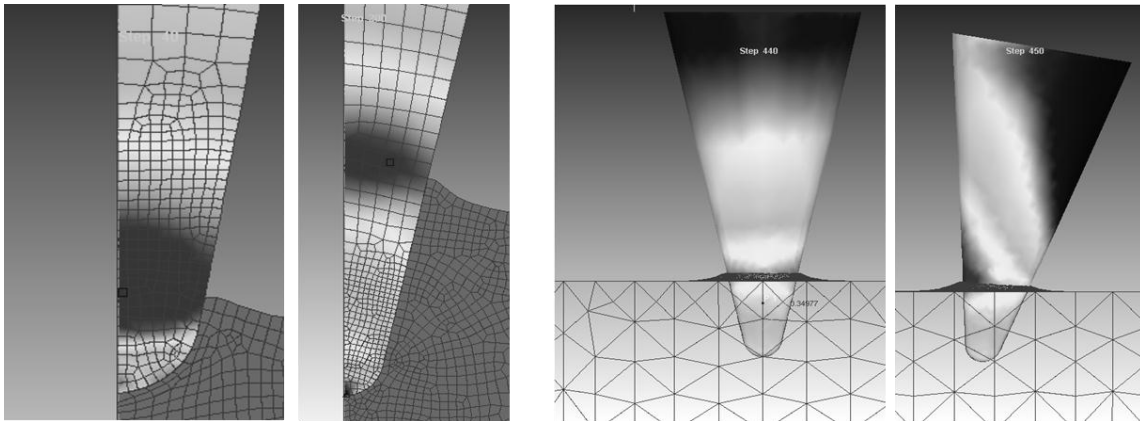


Abbildung 70: Simulation der Beanspruchung der LSS in der Schraube beim Eindringen in den Untergrund

Merksatz zu Simulationen zur Bestimmung von LSS

Um LSS zu identifizieren verwende Simulationsprogramme, die die Materialbeanspruchung darstellen und schließe von den LSS auf die WFP und Funktionen. So kann z.B. nachgewiesen werden, über welche WFP die meiste Kraft oder Information übertragen wird. Nutze die Simulation, um die Beanspruchung der LSS mit den stofflichen und geometrischen Eigenschaften des Bauteils abzugleichen.

6.3.3 Kraft- und Spannungs- induzierende Materialien

Es gibt Materialien, die bei Belastung ihre Eigenschaften ändern. Z.B. brechen manche Polymethylmethacrylat Materialien (z.B. Plexiglas) das Licht je nach Wert und Richtung der aufgebrachtten Spannung unterschiedlich. Zwar sind für diese Vorgehensweise Bauteile aus Polymethylmethacrylat herzustellen, die sehr wahrscheinlich andere Eigenschaften als das Ursprungsmaterial besitzen, aber diese Heuristik kann helfen Spannungs- beaufschlagte Zonen im System zu identifizieren. Grundsätzlich können alle sich ähnlich verhaltenden Materialien helfen die LSS zu identifizieren. Als „ähnlich“ können alle Materialien bezeichnet werden, die die beaufschlagte Kraft bzw. Spannung aufzeigen.

In Abbildung 71 ist ein mechanischer Dübel in einem Polymethylmethacrylatkörper verankert. Wenn der Dübel angezogen wird, kann anhand der Lichtbrechung im Polymethylmethacrylatkörper erkannt werden, wie der Spannungsverlauf im

Untergrund ist. Daraus kann auf die LSS im Untergrund geschlossen werden, wenn dort ein Dübel gesetzt wird.

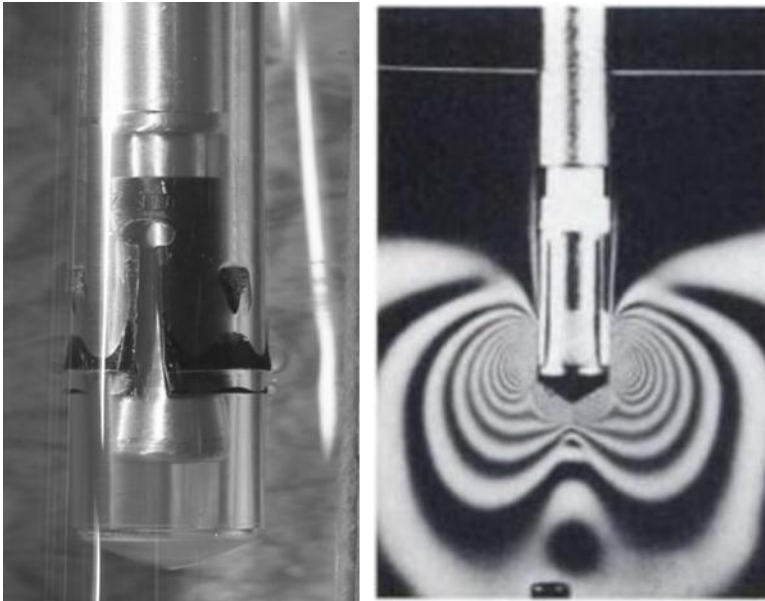


Abbildung 71: durch den Dübel induzierte Spannungen im Untergrund³³⁵

Merksatz zu kraft- und spannungsindizierende Materialien und Vorrichtungen zur Bestimmung von LSS

Um LSS zu identifizieren, nutze Materialien oder mechatronische Hilfsmittel wie z.B. Dehnmessstreifen, die die beaufschlagte Kraft bzw. Spannung aufzeigen und schließe von den LSS auf die WFP und Funktionen.

6.4 Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen

Bereits bei der Betrachtung technischer Systeme mit dem bloßen Auge können Funktionen definiert werden. Diesen Funktionen alle relevanten WFP, LSS und Connectoren zuzuordnen ist oft herausfordernd. Die meisten technischen Systeme besitzen eine Vielzahl an parallel und sequentiell wirkenden Funktionen, so dass eine Zuordnung einzelner Funktionen zu den Gestaltfunktionselementen schwierig ist. Um die Funktionen zu differenzieren und von den Funktionen auf die Gestaltfunktionselemente schließen zu können, sind im Folgenden Heuristiken beschrieben, die hier eine Hilfestellung bieten können (siehe auch Abbildung 72).

³³⁵ Quelle rechtes Bild: Eligehausen et al 2006 S. 16

Steckbrief zur Heuristik:

Wann: Wenn Funktionen im technischen System identifiziert werden sollen

Wofür: Um mit der Identifizierung von Funktionen auf die Gestaltfunktionselemente, Connectoren und Funktionen zu schließen und so Systemverständnis aufbauen zu können

6.4 Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen

6.4.1 Zeitlich veränderte Betrachtungen der Systemoperationen

6.4.2 Anhalten der Systemoperationen

6.4.3 Nachstellen einzelner Funktionen

6.4.4 Eliminierung aller WFP bzw. LSS bis auf das Relevant

6.4.5 Eliminierung des relevanten WFP bzw. LSS

6.4.6 Veränderung der Eigenschaften der WFP bzw. LSS

Abbildung 72: Aufbau dieses Kapitels

6.4.1 Zeitlich veränderte Betrachtungen der Systemoperationen

Durch eine Beschleunigung oder Verlangsamung von Systemoperationen, können Funktionen definiert werden, die dem Beobachter sonst verborgen geblieben wären. Ein Beispiel hierfür sind die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Schraubenspitze (siehe Abbildung 73).

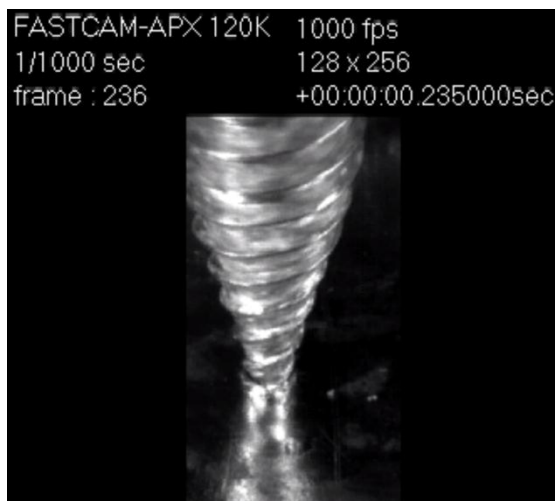


Abbildung 73: Hochgeschwindigkeits- Videoaufnahmen des Setzprozesses einer Schraube

Ohne diese wäre eine Analyse des Einschraubvorganges schwer möglich gewesen. Um dies zu verdeutlichen: der reale Einschraubvorgang dauert ca. 0.3 Sekunden. Eine Videoaufnahme dehnt diese Zeitspanne auf ca. 60 Sekunden aus. Dadurch können Funktionen, wie z.B. „Schraube verdrängt Material“ beobachtet werden.

Merksatz zu zeitlich veränderte Betrachtungen der Systemoperationen zur Bestimmung von Funktionen

Um Funktionen zu identifizieren, kann es hilfreich sein die Systemoperation beschleunigt oder verlangsamt zu betrachten, wie es z.B. durch eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme möglich ist. Schließe von den Funktionen auf die WFP und LSS.

6.4.2 Anhalten der Systemoperationen

Eine Hilfestellung bei der Identifizierung von Funktionen kann sein, das System zu verschiedenen Zeitpunkten in der Systemoperation anzuhalten und zu analysieren, welche Funktionen zu diesem Zeitpunkt ausgeführt werden. Die Zuordnung der Funktionen zu den Gestaltfunktionselementen zeigt, ob es sich noch um dieselben Funktionen handelt. Im Beispiel der selbstpenetrierenden Schraube, soll die Schraube in verschiedenen Zuständen im Setzprozess angehalten werden, um die Funktionen zu identifizieren. Die Schliffe in der Mitte und rechts in Abbildung 74 zeigen Schrauben, die zu verschiedenen Zeitpunkten angehalten wurden. Um einen noch früheren Zeitpunkt zu ermöglichen, wurde die Schraube im linken Schliff während eines frühen Zeitpunktes im Einschraubprozess mittels einer Hülse angehalten.

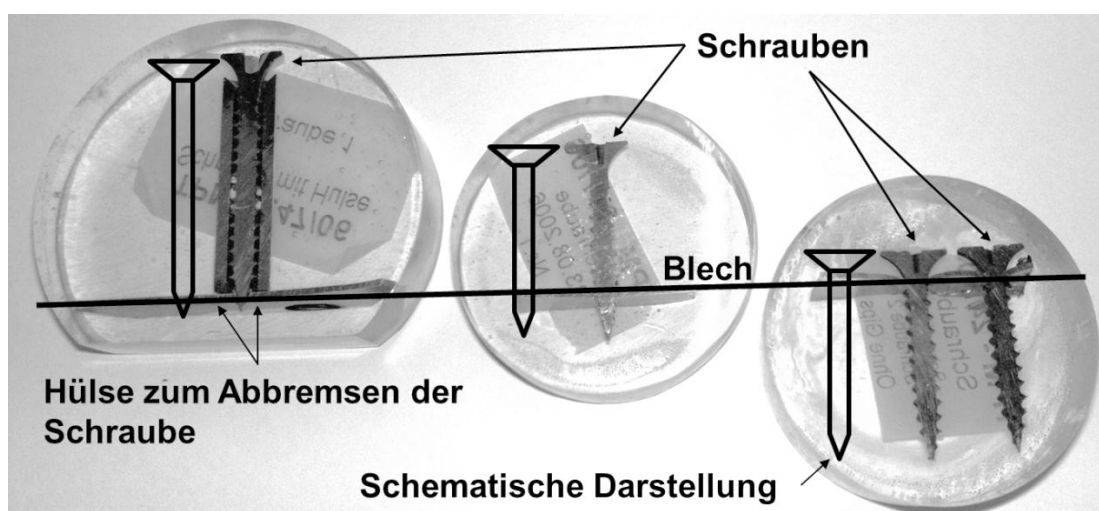


Abbildung 74: Einschraubvorgang der Spitze, zu verschiedenen Zeitpunkten angehalten

Merksatz zu Anhalten der Systemoperationen zur Bestimmung von Funktionen

Um Funktionen zu identifizieren, betrachte das technische System zu verschiedenen Zeitpunkten und weise jeder Funktion die entsprechenden WFP und LSS zu.

6.4.3 Nachstellen einzelner Funktionen

Es kann hilfreich sein, Funktionen mit Teilen des technischen Systems nachzustellen. Gerade die langsame Nachstellung erleichtert die Identifizierung von Funktionen. Hilfsmittel sind hier (demontierte) Baugruppen des Systems, Prototypen und Ersatzmaterialien. Ein Beispiel hierzu ist die Analyse des Setzvorganges der Schraubenspitze mit einem Prototyp aus Kunststoff und einem Untergrund aus Plastilin (siehe Abbildung 75).

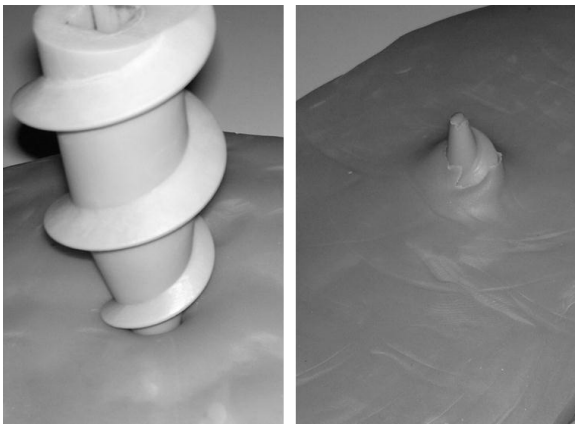


Abbildung 75: Nachstellung des Einschraubprozesses mit einem 10fach vergrößerten Prototyp und Plastilin als Untergrund

In Beispielsystem 2 wird beschrieben, dass ein Teil der Schrauben im Magazin kopfüber in das Transportrohr fallen. Abbildung 76 zeigt die Nachstellung der Funktion: „Schraube fällt aus dem Magazin in die Vereinzelungseinheit.“

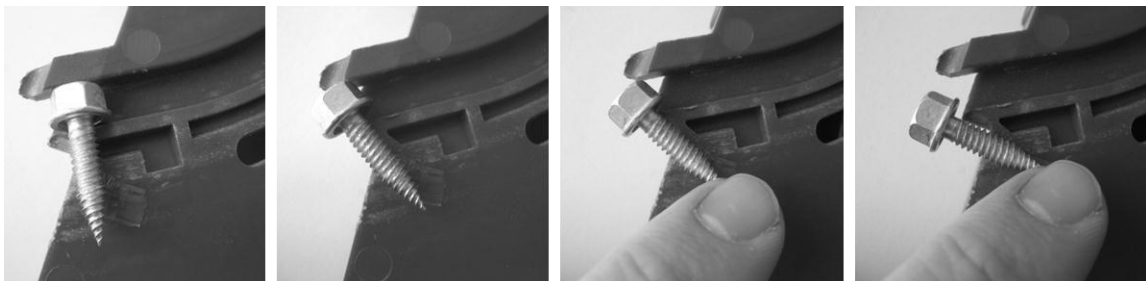
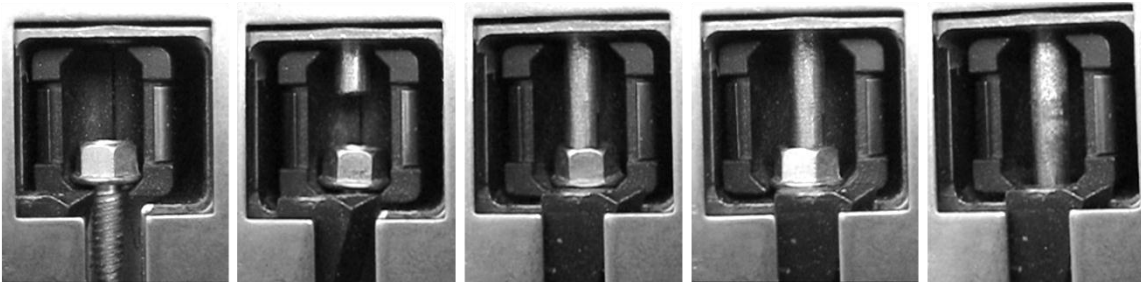


Abbildung 76: Nachstellung der Funktion „Schraube fällt kopfüber aus dem Magazin“

Die Nachstellung beweist, dass die Schraube aus dem Magazin Kopf voran in den Halter der Vereinzelungseinheit fallen kann. Bei einer idealen Systemoperation fällt die Schraube senkrecht in den Halter und wird mit der Spitze voran von dem Stab in das Transportrohr gestoßen (siehe Abbildung 77 oben). Wenn die Schraube mit einem gewissen Winkel aus dem Magazin fällt, liegt sie schräg im Halter. Die Schraube wird in diesem Fall durch den Stab beim Ausstoßen weiter gedreht und schließlich Kopf über in das Transportrohr gestoßen (siehe Abbildung 77 unten). Durch die Nachstellung kann die (Fehl-) Funktion „Schraube fällt Kopf über in das Transportrohr“ in zwei (Fehl-) Unterfunktionen aufteilt werden: „Schraube fällt schräg aus dem Magazin in den Halter der Vereinzelungseinheit“ und „Schraube wird durch den Stab beim Ausstoßen weiter gedreht.“ Nur das Zusammenspiel der Funktionen führt zur Fehlfunktion des gesamten Systems.

Halte- und Transportfunktion verläuft ohne Fehler



Halte- und Transportfunktion verläuft mit Fehler

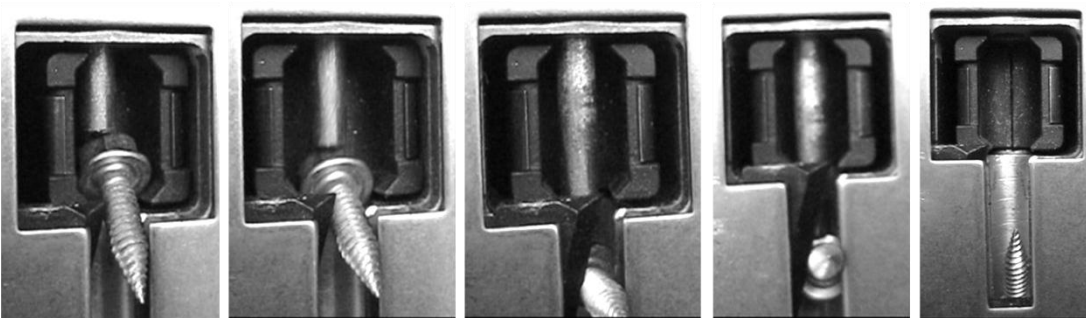


Abbildung 77: Nachstellung einer idealen Vereinzelung und einer Vereinzelung mit einer schräg in den Halter gefallenen Schraube

Zu den Fehlunterfunktionen können die beteiligten WFP und LSS gesucht und diese mit Schrauben verglichen werden, bei denen es nicht zu den Fehlfunktionen kommt. Durch den Vergleich der Funktion kann herausgefunden werden, welche WFP und LSS im System zu verändern sind, um diese Fehlfunktion zu eliminieren.

Merksatz zum Nachstellen einzelner Funktionen, um Funktionen zu bestimmen

Um Funktionen zu identifizieren, stelle die Systemoperationen mit einzelnen Bauteilen des Systems nach und schließe von den Funktionen auf die WFP und LSS.

6.4.4 Eliminierung aller irrelevanten WFP bzw. LSS

Um zu beweisen, dass ein oder mehrere WFP an einer Funktionserfüllung beteiligt sind, können alle anderen potentiell funktionsausführenden WFP und damit LSS eliminiert werden. Kann dann immer noch dieselbe Funktion in derselben Qualität und Zeitspanne festgestellt werden, ist der Beweis erbracht, dass es sich um das relevante³³⁶ Funktionsgestaltelement handelt. Als Beispiel kann hier die Funktion in der Drehmomentübertragung zwischen Bit und Recess in WFP A1 angeführt werden. In Abbildung 78 ist in der Mitte ein Bit im Originalzustand zu sehen. Mit diesem werden die maximal übertragbaren Drehmomente gemessen. Anschließend werden an dem Bit alle potentiell funktionsausführenden WFP eliminiert, außer WFP A1 - was in Bild rechts zu sehen ist. Der Bit kann nach der Modifikation dasselbe Drehmoment übertragen, wodurch der Beweis erbracht ist, dass das Drehmoment durch WFP A1 übertragen wird.

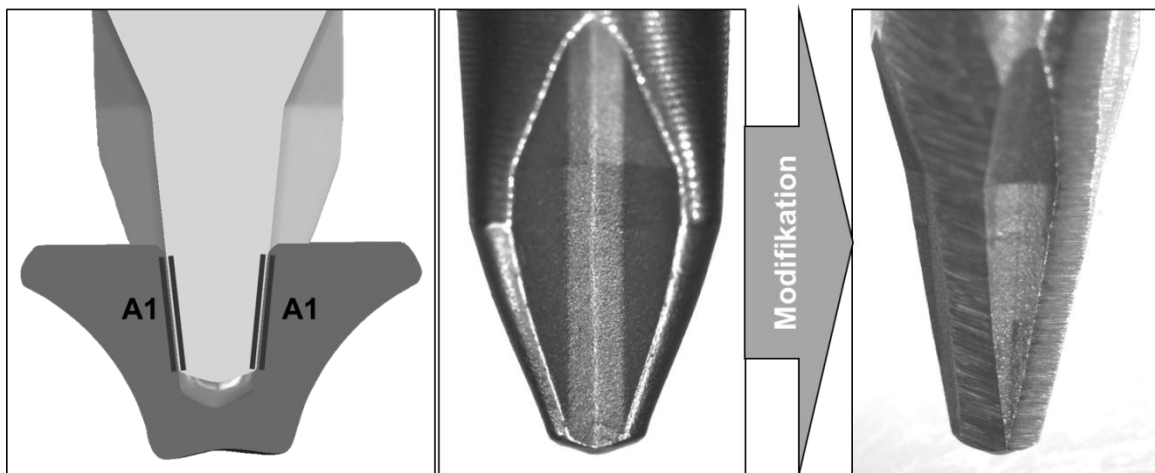


Abbildung 78: Nachweis für der Funktion „Drehmoment übertragen“ des WFP A1³³⁷

³³⁶ Als relevant werden hier die WFP und LSS bezeichnet, die die Funktion ausführen

³³⁷ Vgl. Schwerdtfeger 2007

Merksatz zu Eliminierung aller WFP bzw. LSS bis auf das Relevante zur Bestimmung von Funktionen

Um Funktionen nachzuweisen, eliminiere alle WFP bzw. LSS, außer die für die Funktion (vermutlich) relevanten. Wenn die Funktion und die Funktionseigenschaften gleich bleiben, kann die Verknüpfung der Funktion zu ihren Gestaltfunktionselementen nachgewiesen werden.

6.4.5 Eliminierung des relevanten WFP bzw. LSS

Genau das Gegenteil von der eben beschriebenen Vorgehensweise ist das Eliminieren des oder der relevanten WFP (oder LSS). Sobald nur ein WFP der Funktion fehlt, darf diese gar nicht mehr, oder nicht mehr in derselben Qualität stattfinden. Es ist aber möglich, dass die verbleibenden WFP oder andere WFP die Funktionserfüllung übernehmen. Für eine robuste Konstruktion kann dies gewollt sein.

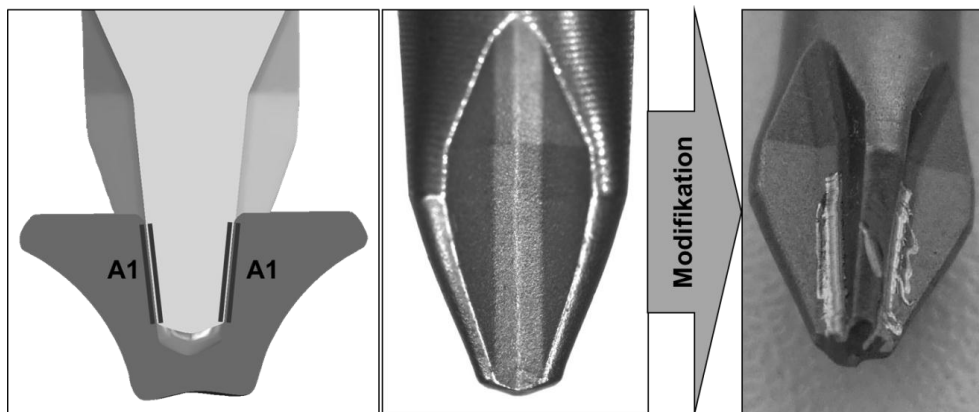


Abbildung 79: Nachweis für der Funktion „Drehmoment übertragen“ des WFP A1³³⁸

In Abbildung 79 ist in der Mitte der Bit im Originalzustand zu sehen. Auch hier wird das übertragbare Drehmoment vor und nach der Modifikation verglichen.

Bei der Modifikation wird das funktionsausführende („Drehmoment übertragen“) WFP A1 eliminiert, was auf dem Bild rechts zu sehen ist. Der modifizierte Bit kann nur ein deutlich geringeres Drehmoment übertragen. In diesem Fall übernehmen die WFP B2 und C3 (siehe Abbildung 54) die Drehmomentübertragung.

Ein weiteres Beispiel für diese Heuristik ist in Abbildung 80 dargestellt. Für eine dichte Schraubverbindung, muss die Schraube, wie sie in der Abbildung dargestellt ist, an

³³⁸ Vgl. Schwerdtfeger 2007

WFP 1, 2 und 3 dichten. Um z.B. zu überprüfen, ob WFP 2 auch Teil der Funktion „Schraube dichtet Verbindungsstelle ab“ ist, kann dieses durch eine Nut (mittleres Bild in Abbildung 80) teilweise aufgelöst werden. Die Dichtigkeitsprüfung zeigt, dass die zuvor dichte Schraubverbindung mit der Modifikation undicht wird. Dies ist erkennbar an der austretenden Farbe zwischen Dichtscheibe und Schraubenkopf.

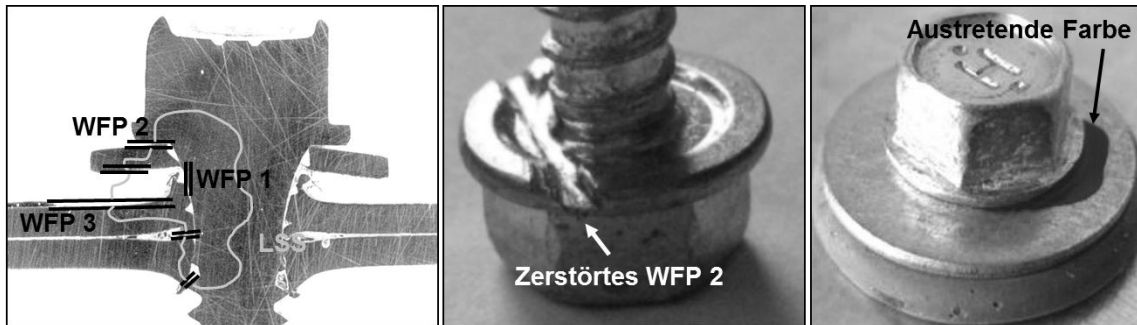


Abbildung 80: Beweis, dass ein WFP an der Funktion beteiligt ist, indem es zerstört wird

Merksatz zu Eliminierung des relevanten WFP bzw. LSS zur Bestimmung von Funktionen

Um Funktionen nachzuweisen, eliminiere nur die relevanten WFP bzw. LSS. Wenn die Funktion dann nicht mehr oder in einer verminderten Qualität stattfindet, kann die Verknüpfung der Funktion zu ihren Gestaltfunktionselementen nachgewiesen werden.

6.4.6 Veränderung der Eigenschaften der WFP bzw. LSS

Die in den beiden vorherigen Kapiteln beschriebenen Vorgehensweisen können nicht nur angewendet werden, indem WFP bzw. LSS eliminiert werden. Auch eine Veränderung der Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente kann helfen Funktionen nachzuweisen und sie mit den WFP bzw. LSS zu verknüpfen. Ein Beispiel wäre hier die gezielte Veränderung der Spitzenbreite oder der Spitzenhärte der Schraube. Wenn sich dann die Funktion „Körnen“ verändert, ist der Zusammenhang zwischen Gestaltfunktionselement und Funktion hergestellt. In Abbildung 81 ist z.B. eine Schraube dargestellt, deren stoffliche Eigenschaften verändert ist: die Härte der Schraube ist deutlich herabgesetzt, wodurch sich die Spitze beim Kontakt mit dem Untergrund plastisch verformt. WFP A1 ist dann nicht mehr Teil der Funktion „Schraube körnt den Untergrund“, sondern „Untergrund verformt die Schraubenspitze“. Als Folge kann die Schraube nicht in den Untergrund gesetzt werden.

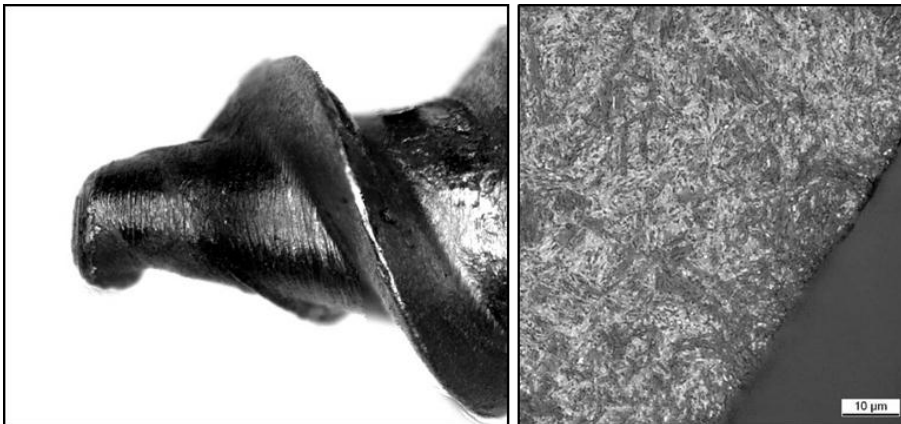


Abbildung 81: Schraubenspitze mit veränderten stofflichen Eigenschaften (Schliffbild)

Merksatz zum gezielten Verändern der Eigenschaften der WFP bzw. LSS zur Bestimmung von Funktionen

Um Funktionen nachzuweisen, verändere die Gestalteigenschaften der vermutlich relevanten Gestaltfunktionselemente. Wenn sich dann die Funktionseigenschaften ändern, kann die Verknüpfung der Funktion zu ihren Gestaltfunktionselementen nachgewiesen werden.

Anmerkung: diese Heuristik ist eng verbunden mit dem folgenden Kapitel

6.5 Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, muss in der Entwicklung nicht nur ein qualitatives, sondern auch ein quantitatives Systemverständnis aufgebaut werden. Das qualitative Systemverständnis verknüpft die Gestalt mit der Funktion, es definiert welche WFP, Connectoren und LSS bei einer Funktion beteiligt sind. Das quantitative Systemverständnis beschreibt den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Funktionen und der Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente. Dazu sollen folgende Begriffe definiert werden.³³⁹

- **Funktionseigenschaften [FE]** sind quantifizierende Eigenschaften der Funktion. Die Funktionseigenschaften sind von den Eigenschaften der Umgebung (Eigenschaften der Connectoren) und den Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente abhängig. Beispiele für Funktionseigenschaften sind Bremsleistung einer Fahrradbremse, die Einschraubzeit oder die

³³⁹ Vgl. Matthiesen 2002 auf S. 57ff

Setzausfallrate einer Schraube, Kundenakzeptanz zu einem neuen Produkt, etc.

- **Wirkungseigenschaften [WE]** sind quantifizierende Eigenschaften der Wirkung in einem WFP oder einer LSS. Wirkungseigenschaften werden durch die Gestalteigenschaften der WF oder der LSS bestimmt. Beispiele sind die übertragene Kraft, Reibkraft oder Drehmoment in einem WFP oder einer LSS. Alle Eigenschaften der an einer Funktion beteiligten Wirkungen ergeben die Funktionseigenschaften. Beispiele wären die übertragbare Reibkraft in einem WFP, die maximale elastische Dehnung einer Feder, etc.
- **Gestalteigenschaften [GE]** sind die Eigenschaften der Gestalt eines Gestaltfunktionselementes (WF, LSS). Die Eigenschaften quantifizieren die Gestaltfunktionselemente in geometrischer und stofflicher Hinsicht und bestimmen die Wirkungs- bzw. Funktionseigenschaften. Beispiele sind Länge, Breite, Härte, Volumen, chemische Zusammensetzung, Materialstruktur, etc.

Der C&C²-Ansatz bietet die Möglichkeit, ein quantitatives Systemverständnis aufzubauen, sprich eine Verknüpfung zwischen Funktionseigenschaften und Gestalteigenschaften herzustellen. Im Folgenden werden Heuristiken dargestellt, die helfen sollen Gestalt- und Funktionseigenschaften mit dem C&C²-Ansatz zu bestimmen und zu verknüpfen (siehe Abbildung 82). Die Heuristiken für Funktionseigenschaften gelten teilweise auch für die Wirkungseigenschaften.

Steckbrief zur Heuristik:

Wann: *Bei der quantitativen Beschreibung von Funktions- und Gestalteigenschaften*

Wofür: *Aufbau von (qualitativem und) quantitativem Systemverständnis*

Der Aufbau von quantitativem Systemverständnisses mit dem C&C²-Ansatz hat folgende Vorteile:

- In den vorherigen Kapiteln wurden Heuristiken zur Bestimmung qualitativer Zusammenhänge beschrieben. Mit der Bestimmung der Funktions- und Gestalteigenschaften können qualitative Zusammenhänge quantifiziert werden und die Relevanz der einzelnen Gestaltfunktionselemente für eine Funktion bestimmt werden.

- Es können Gestalteigenschaften (Geometrie, stoffliche Eigenschaften) bewusst verändert werden, um die Funktionseigenschaften zu verbessern. Beim rein qualitativen Verständnis, können nur WFP hinzugefügt oder eliminiert werden.
- Anhand quantitativer Daten zu den Gestalt- und Funktionseigenschaften können mit Hilfe mathematischer Methoden (z.B. Korrelationsanalyse) Zusammenhänge zwischen Funktion und Gestalt bestimmt werden, ohne dass dieser Zusammenhang qualitativ bekannt ist. Es kann also auch durch die quantitative Verknüpfung auf qualitative Zusammenhänge geschlossen werden.

6.5 Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften

6.5.1 Verknüpfung durch mathematische Methoden

6.5.2 Verknüpfung durch Variation der WFP Anzahl

6.5.3 Verknüpfung mit vereinfachter Gestalt und Testmethoden

6.5.4 Verknüpfung durch Simulationsmethoden

Abbildung 82: Inhalt des Kapitels 6.5

Die Basis für die quantitative Verknüpfung ist, dass zu den Funktions- und den Gestalteigenschaften parallel Daten erhoben werden. Gestalteigenschaften können z.B. bestimmt werden, indem WFP vermessen werden oder LSS über Materialanalysen spezifiziert werden. Die Quantifizierung der Funktionseigenschaften kann z.B. über Zeiterfassung, Ausfallrate oder Kundenzufriedenheit ermittelt werden. Abbildung 83 zeigt das Vorgehen im Projekt zur Optimierung der Schraubenspitze (Beispielsystem 1). Zunächst wird qualitatives Systemverständnis aufgebaut: es wird analysiert und definiert, wo in der Gestalt (WFP, Connectoren, LSS) die Funktionen ausgeführt werden (siehe Punkt 1 in Abbildung 83). Z.B. welche WFP an den Funktionen „Schraube körnt den Untergrund“ und „Schraube verdrängt das Untergrundmaterial“ beteiligt sind. Anschließend werden quantitative Daten erhoben (siehe Punkt 2 in Abbildung 83). Um die Gestalteigenschaften in diesem Projekt zu definieren, wird z.B. die Spitzenbreite der Schrauben vermessen. Für die Definition der Funktionseigenschaften wird z.B. die Zeitspanne gemessen, über die die Funktion „Schraube körnt den Untergrund“ existiert bzw. andauert. Durch die Verknüpfung dieser beiden Eigenschaften kann analysiert werden, ob ein Zusammenhang zwischen den Gestalteigenschaften und den Funktionseigenschaften besteht. Wenn z.B. die Zeitspanne der Funktion „Schraube körnt den Untergrund“ mit zunehmender Spitzenbreite abnimmt oder zunimmt, wäre das ein Hinweis dafür, dass ein

Zusammenhang zwischen der Gestalteeigenschaft Spitzenbreite und der Funktion „Schraube körnt den Untergrund“ existiert. Bleibt die Zeitspanne der Funktion unabhängig von der Spitzenbreite gleich, wäre das ein Hinweis dafür, dass die Funktion von der Spitzenbreite unabhängig ist. In dem Projekt kann auf diese Weise Systemverständnis aufgebaut und so die Funktionalität der selbstpenetrierenden Schraube erheblich verbessert werden: die maximale Untergrunddicke der Schraube kann von 0,75mm auf 2,50mm erhöht werden.

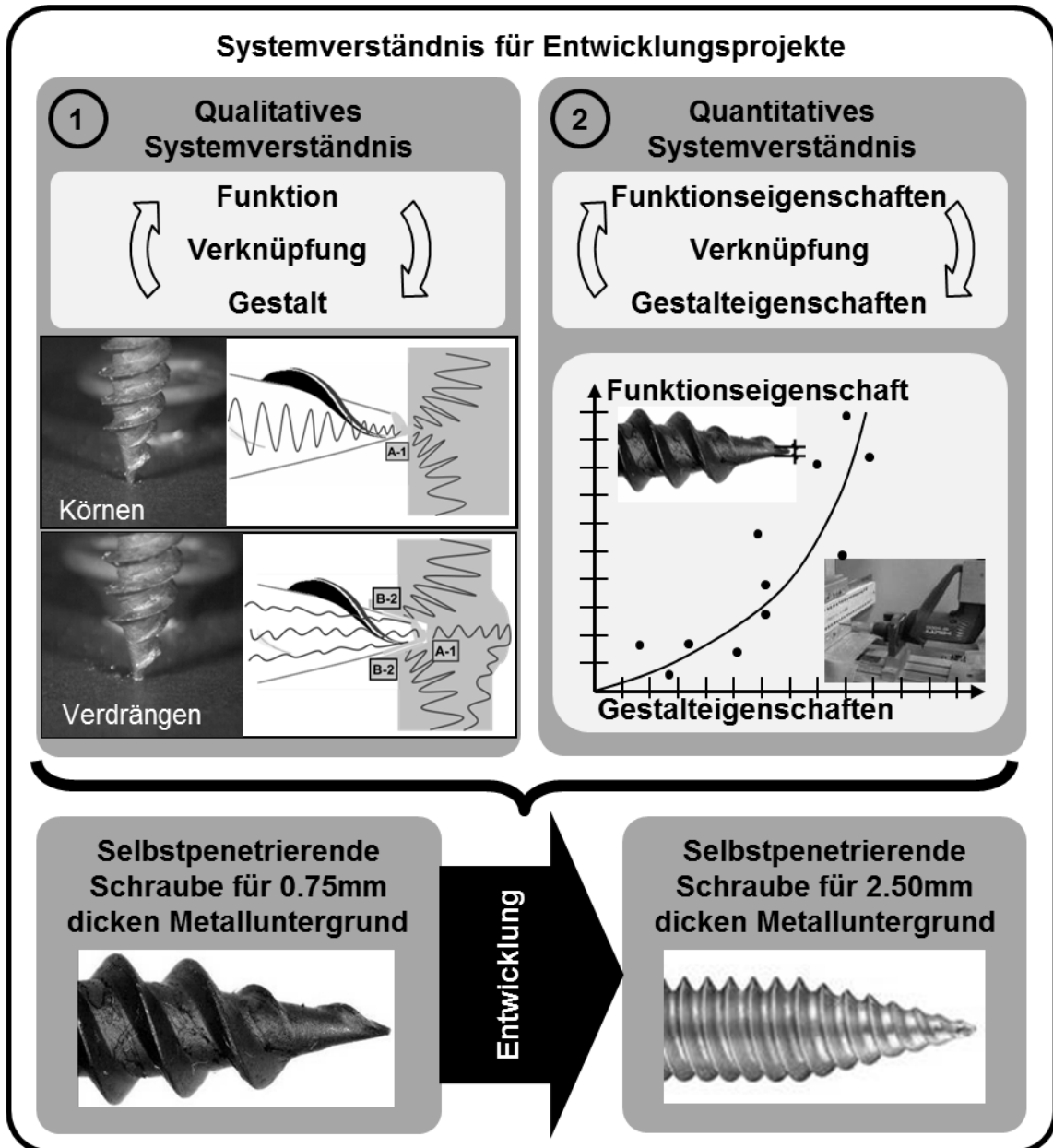


Abbildung 83: parallelisierte Aktivitäten bei Systemanalyse mit C&C²-Ansatz

Merksatz zur Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften

Um quantitatives Systemverständnis aufzubauen, bestimme parallel die Funktionseigenschaften und die Gestalteigenschaften. Durch die Verknüpfung der Funktions- und Gestalteigenschaften können quantitative C&C²-Modelle aufgebaut werden, in denen nicht nur beschrieben wird, dass ein WFP an einer Funktion beteiligt ist, sondern auch wie stark die stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Gestaltfunktionselemente die Eigenschaften der Wirkung und damit die Eigenschaften der Funktion beeinflussen.

Die Verknüpfung der Funktions- und Gestalteigenschaften kann sich sehr herausfordernd gestalten. Ursachen hierfür können z.B. sein:

- Die Systemoperation basiert auf vielen parallel ablaufenden Funktionen, so dass eine Differenzierung der Funktionseigenschaften erschwert wird.
- Die Systemoperation basiert auf vielen sequentiell ablaufenden Funktionen, so dass eine Differenzierung der Funktionseigenschaften erschwert wird.
- Eine Funktion wird durch eine hohe Anzahl an WFP, Connectoren und LSS ausgeführt, so dass der Beitrag des einzelnen WFP oder LSS schwer zu bestimmen ist.

Im Folgenden werden Heuristiken beschrieben, die helfen sollen Funktions- und Gestalteigenschaften zu verknüpfen.

6.5.1 Verknüpfung durch mathematische Methoden

Mathematische Methoden können eingesetzt werden, um den Zusammenhang zwischen Funktions- und Gestalteigenschaften zu bestimmen. Der Ansatz hierbei ist, durch die Variation der Gestalteigenschaften und den daraus resultierenden variierenden Funktionseigenschaften Zusammenhänge zu definieren. Bei dieser Vorgehensweise muss unterschieden werden, ob die Variation der Gestalteigenschaften bestimmbar oder nicht bestimmbar ist.

Auf Basis undefinierter Variation des technischen Systems

Wenn für die Analyse nur unbestimmte³⁴⁰ Variationen des technischen Systems zur Verfügung stehen, ist meist eine große Menge an Daten notwendig, um statistisch gesicherte Aussagen über den Zusammenhang von Funktions- und Gestalteigenschaften zu erhalten. Hierfür gibt es eine Reihe mathematischer Methoden, um signifikante Zusammenhänge zu ermitteln. Oft hilft dabei schon, die Zusammenhänge in Diagrammen zu veranschaulichen.

Im Projekt zur Optimierung der Schraubenspitze (Beispielsystem 1) stehen nur Schrauben mit undefinierten Gestaltvariationen zur Verfügung. Es werden über 2500 Datensätze zu Funktions- und Gestalteigenschaften generiert und mittels verschiedener mathematischer Methoden Zusammenhänge ermittelt. So werden z.B. nur die besten zehn und die schlechtesten zehn Schraubenlose³⁴¹ für die Analyse verwendet. Als beste bzw. schlechteste Lose werden die bezeichnet, mit den geringsten bzw. höchsten Setzzeiten.

Es wird die Hypothese angenommen, dass je kleiner die Spitzenbreite, umso geringer ist auch die Einschraubzeit eines Loses. Ziel ist die Berechnung eines Grenzwertes für die Spitzenbreite, so dass die Schrauben immer noch niedrige Setzzeiten aufweisen. Der Grenzwert soll für eine optische Beurteilung dienen, ob es sich um eine gute oder schlechte Schraube handelt. Wenn die besten zehn Schraubenlose unterhalb des Grenzwertes und die schlechtesten zehn Schraubenlose oberhalb des Grenzwertes liegen, wäre die Hypothese vollständig bestätigt. Die mathematische Berechnung des Grenzwertes ist im Diagramm in Abbildung 84 veranschaulicht. Auf der Ordinate ist die Gestalteigenschaft „Breite der Spitze“ und auf der Abszisse die Funktionseigenschaft „Einschraubzeit“ aufgetragen.

Um den Grenzwert zu bestimmen, wird dieser vertikal verschoben, bis die maximale Anzahl der besten zehn Schraubenlose unterhalb und die maximale Anzahl der

³⁴⁰ „unbestimmt“ im Sinne, dass keine definierten Variationen des technischen Systems vorliegen, sondern die Variationen der Gestalt andere Gründe hat, wie z.B. Produktionsschwankungen

³⁴¹ Ein Los wird durch 50 Schrauben repräsentiert; diese 50 Schrauben werden vermessen und gesetzt; aus dem Mittelwert dieser 50 Werte werden die Gestalt- und die Funktionseigenschaften des Loses bestimmt, wie z.B. die Spitzenbreite und die Einschraubzeit

schlechtesten zehn Schraubenlose oberhalb der Grenzwertlinie liegt³⁴² - gekennzeichnet durch die mittelgrauen Flächen im Diagramm. Die dunkelgrauen Felder markieren die Bereiche, in denen die Hypothese widerlegt werden würde: die besten zehn Schraubenlose mit Spitzenbreiten oberhalb des Grenzwertes bzw. die schlechtesten zehn Schraubenlose mit Spitzenbreiten unterhalb des Grenzwertes. Die restlichen Schraubenlose im hellgrauen Bereich werden für diese Berechnung bewusst vernachlässigt (Schraubenlose zwischen den besten und schlechtesten zehn).

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass der Grenzwert der Gestalteigenschaft „Spitzenbreite“ ein Kriterium ist, das alle Schraubenlose erfüllen müssen, um gute Setzzeiten aufzuweisen. Daher sind alle der zehn besten Schraubenlose innerhalb des Grenzwertes (Lose befinden sich im linken mittelgrauen Feld unterhalb der Grenzwertlinie).

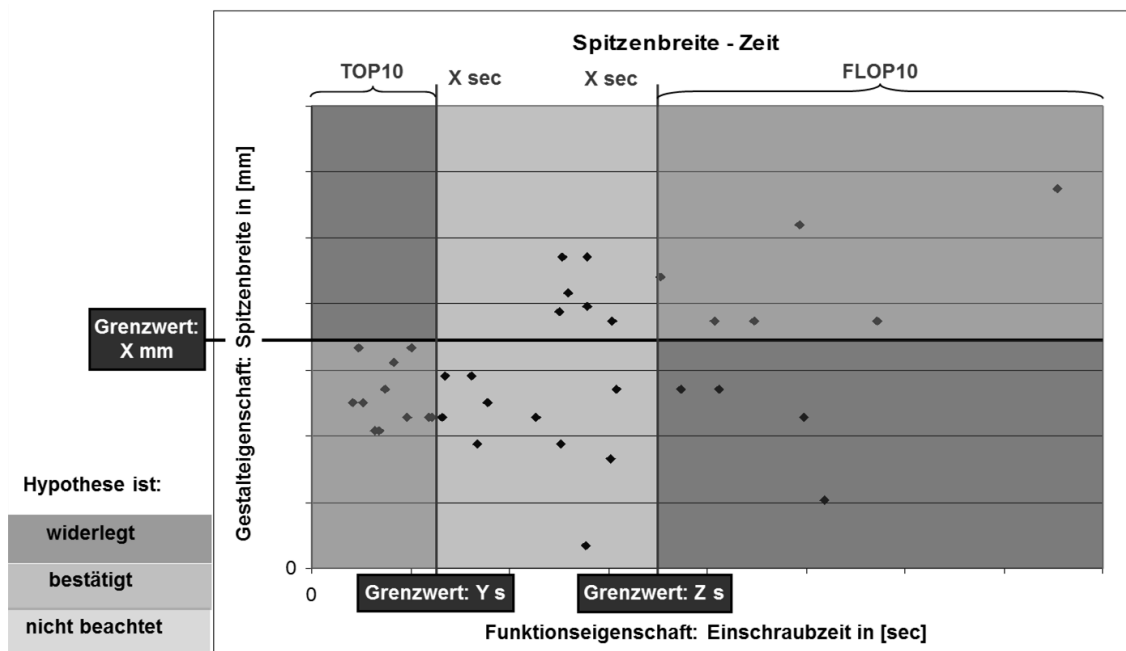


Abbildung 84: Ermittlung einer optimalen Gestalteigenschaft anhand der Funktionseigenschaft

Die schlechtesten zehn Schraubenlose zeigen hingegen, dass die Funktionseigenschaft „Einschraubzeit“ auch dann schlecht sein kann, wenn die Spitzenbreite innerhalb des Grenzwertes liegt: die Lose liegen sowohl ober- als auch unterhalb des Grenzwertes. Dies kann damit begründet werden, dass die Spitzenbreite

³⁴² Bei anderen Gestalteigenschaften kann die Auswertung auch darin bestehen, die maximale Anzahl der besten Schrauben oberhalb des Grenzwertes und die maximale Anzahl der schlechtesten zehn Schrauben unterhalb des Grenzwertes zu haben

zwar die Funktion „Schraube körnt den Untergrund“³⁴³ beeinflusst, aber andere relevante Funktionen nicht. Das bedeutet, dass eine Schraube immer noch schlechte Eigenschaften in der Hauptfunktion „Schraube schraubt sich in den Untergrund“ aufweisen kann, obwohl die Funktionseigenschaften der Funktion „Schraube körnt den Untergrund“ sehr gut sind.

Dieses Beispiel zeigt, wie mit Hilfe des qualitativen Systemverständnisses die optimalen Gestalteigenschaften für die optimalen Funktionseigenschaften definiert werden können.

Merksatz zur Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften mittels mathematischer Methoden bei undefinierten bzw. unbestimmten Variationen der Gestalteigenschaften des technischen Systems

Um bei unbestimmten Variationen des technischen Systems die Zusammenhänge zwischen Funktionseigenschaften und Gestalteigenschaften zu bestimmen, ist eine höhere Anzahl von Daten zu erheben, um eine statistische Sicherheit in den Aussagen zu erzielen. Nütze Diagramme und mathematische Methoden, um die Zusammenhänge zu bestimmen.

Auf Basis definierter Variationen des technischen Systems

Wenn die Gestalteigenschaften des technischen Systems bestimmbar sind, sprich gezielt variiert werden können, ist eine geringere Anzahl an Daten bzw. Variationen des technischen Systems notwendig, um Zusammenhänge zwischen Funktions- und Gestalteigenschaften herzustellen. Hier kann z.B. ein DOE³⁴⁴ Versuchsreihe helfen, die Anzahl der verschiedenen Kombinationen (DOE: Anzahl der Durchläufe) von Gestalteigenschaften (DOE: Faktoren bzw. unabhängige Variablen) zu minimieren und trotzdem signifikante Zusammenhänge zwischen den Gestalt- und Funktionsparametern (DOE: Zielgröße) bestimmen zu können.

Im Projekt zur Optimierung der Schraubenspitze (Beispielsystem 1) werden gezielte Veränderungen einzelner Gestalteigenschaften für Versuchsreihen definiert. Mittels DOE werden Prototypen hergestellt, auf denen die Gestalteigenschaften definiert variiert werden. Da eine ausreichend präzise Herstellung der Schrauben mit dem

³⁴³ Siehe Kapitel 5.5

³⁴⁴ Design of Experiments

Serienproduktionsverfahren nicht möglich ist, werden die Prototypen für die Einschraubexperimente gefräst (siehe Abbildung 85).



Abbildung 85: mikrogefräster Schraubenprototyp zur Bestimmung der Verknüpfung zwischen Gestalt- und Funktionseigenschaften

Merksatz zur Verknüpfung Funktions- und Gestalteigenschaften mittels mathematischer Methoden bei definierten bzw. bestimmaren Variationen der Gestalteigenschaften des technischen Systems

Um bei bestimmaren Variationen der Gestalteigenschaften die Zusammenhänge zu den Funktionseigenschaften zu bestimmen, verwende mathematische Methoden, wie z.B. DOE, um mit wenigen Variationen möglichst viele Aussagen zu erhalten.

6.5.2 Verknüpfung durch Variation der WFP Anzahl

Wenn eine Funktion durch viele WFP und LSS ausgeführt wird, kann es hilfreich sein, die Anzahl und die Kombination der wirkenden WFP bzw. LSS in den Versuchen zu variieren. So kann der Anteil der einzelnen WFP bzw. LSS an der Funktionserfüllung bestimmt werden.

Z.B. werden im Projekt zur Optimierung der Schraubenspitze (Beispielsystem 1) Versuche mit einem und zwei Gewindegängen durchgeführt. Hier wird das Delta in den Funktionseigenschaften bestimmt und so quantitative Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Funktions- und Gestalteigenschaften gezogen.

Merksatz zur Bestimmung der Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften durch Variation der Anzahl der Gestaltfunktionselemente

Um den quantitativen Beitrag der einzelnen WFP und LSS einer Funktion zu den Funktionseigenschaften zu bestimmen, variiere die Anzahl der Gestaltfunktionselemente und bestimme dabei die Funktionseigenschaften.

6.5.3 Verknüpfung mit vereinfachter Gestalt des Systems

Wenn Wechselwirkungen zwischen den Funktionen eine eindeutige Zuordnung der Funktions- und Gestalteigenschaften erschweren, können Ersatzsysteme eine Hilfestellung bieten. Das Prinzip des Ersatzsystems besteht darin, die Gestalt zu vereinfachen, so dass weniger Gestaltfunktionselemente existieren. Dadurch finden weniger Funktionen statt und die Anzahl der Wechselwirkungen wird reduziert. Auf diese Weise ist die Zuordnung von Funktions- und Gestalteigenschaften einfacher.

Im Projekt zur Optimierung der Schraubenspitze werden z.B. Versuche mit unterschiedlich großen WFP A1 gemacht. Hierfür werden einfache Prototypen gefertigt und mit diesen die optimale Größe des WFP A1 für die Funktion „Schraube körint den Untergrund“ bestimmt. Der vereinfachte Prototyp besteht nur aus einem Zylinder, bzw. Kegel ohne Gewinde. Damit können die WFP zwischen Gewinde und Untergrund die Ergebnisse zur optimalen Spitzenbreite nicht beeinflussen.

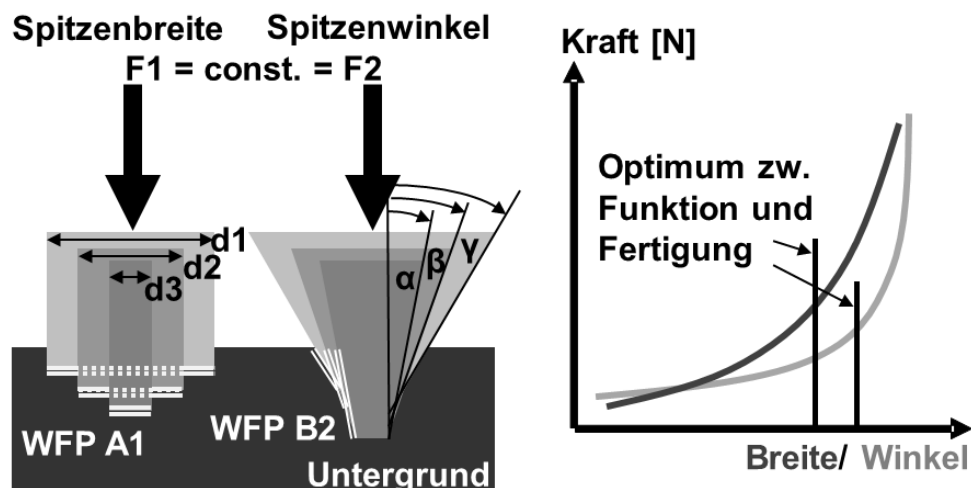


Abbildung 86: Versuche mit einer vereinfachten Geometrie der Schraubenspitze

In Abbildung 86 ist schematisch dargestellt, wie sich die vereinfachten Prototypen beim Körinten verhalten. Je kleiner der Durchmesser und je kleiner der Winkel, umso tiefer dringt die Schraube bei der gleichen Kraft in den Untergrund ein. Produktionstechnisch sind jedoch ein möglichst großer Durchmesser und ein bestimmter Winkel von Vorteil. Auf Basis dieser Versuche mit der vereinfachten Gestalt, kann ein optimaler Kompromiss zwischen Produktion und Funktion definiert werden (dargestellt auf der rechten Seite in Abbildung 86).

Merksatz zur Bestimmung der Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften mittels vereinfachenden Ersatzprüfungen

Um die Funktionseigenschaften den Gestalteigenschaften quantitativ zuordnen zu können, verwende eine vereinfachte Gestalt des technischen Systems. Eine vereinfachte Gestalt besitzt eine reduzierte Anzahl an Gestaltfunktionselementen.

6.5.4 Verknüpfung durch Simulationsmethoden

Simulation kann überall dort eingesetzt werden, wo die Bestimmung bzw. die Variation der Funktionseigenschaften mit dem realen technischen System sehr aufwendig umzusetzen ist. CAD Modelle können beliebig in ihren Gestalteigenschaften (z.B. Länge, Härte, etc. der LSS und WF) verändert werden. Mit der Simulation der variierenden Gestalteigenschaften können die verschiedenen Funktionseigenschaften bestimmt werden.

Ein Beispiel ist in Abbildung 87 zu sehen. Hier wird die Gewindesteigung in den CAD Modellen verändert, um die Auswirkung der Gestaltvariation auf die Funktionseigenschaften mittels Simulation zu bestimmen.

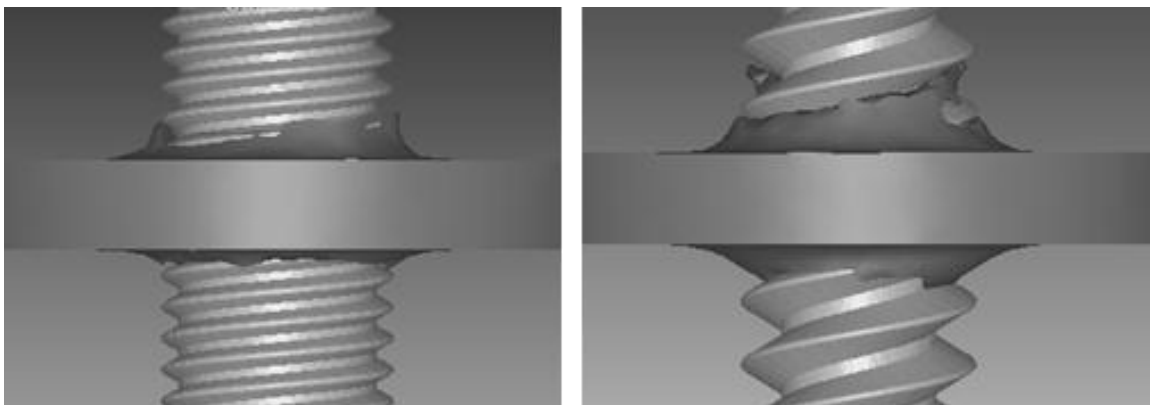


Abbildung 87: Simulationsversuche mit verschiedenen CAD Modellen der Schraube

Merksatz zur Bestimmung der Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften durch Simulationsmethoden

Wenn das reale System aufwendig oder gar nicht verändert werden kann, verwende Simulationsprogramme, um signifikante Zusammenhänge zwischen Funktions- und Gestalteigenschaften zu bestimmen. Die Simulation erleichtert die Modifikation der WFP und LSS des technischen Systems und damit die Durchführung der (simulierten) Testreihen.

6.6 Fazit zu den HMB

In Kapitel 6 werden Heuristiken beschrieben, die helfen können ein C&C²-Modell eines technischen Systems zu bilden. Kern der Aktivitäten der Modellbildung ist, im technischen System die Funktionen und Gestaltfunktionselemente zu identifizieren (qualitativ) und ihre Eigenschaften zu definieren (quantitativ). Die Heuristiken helfen die qualitativen und die quantitativen Daten zu verknüpfen und somit Systemverständnis aufzubauen.

Für die Modellbildung müssen oft mehrere Heuristiken kombiniert werden. Wie in den Heuristiken beschrieben, ist es nicht nur möglich, sondern sehr empfehlenswert die Heuristiken gemeinsam mit anderen Methoden und Modellen anzuwenden. Das Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz und den Heuristiken bedeutet nicht, die bekannten und bewährten Vorgehensweisen zu verwerfen, sondern den Anwender durch zusätzliche Hilfestellung zu unterstützen. Die Heuristiken beschreiben, wie der C&C²-Ansatz mit bekannten Methoden der Produktentwicklung kombiniert werden kann.

Bei der Modellbildung sollte darauf geachtet werden, dass nur für die Zielerreichung relevante Funktionen und Gestaltfunktionselemente identifiziert, sowie deren Verknüpfung dargestellt werden. So kann der Aufwand minimiert und die Größe des Modells möglichst klein gehalten werden.³⁴⁵

Abbildung 88 zeigt eine Übersicht zu den Heuristiken in Kapitel 5 und 6.

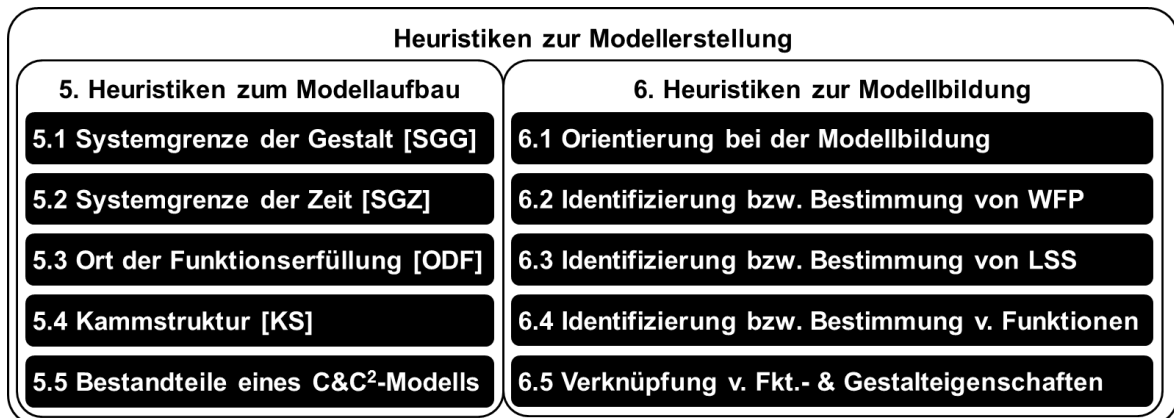


Abbildung 88: Übersicht zu den Heuristiken in dieser Arbeit

³⁴⁵ Vgl. auch Kapitel 2.3.4

7 Validierung der Heuristiken im industriellen Umfeld

Wie in Kapitel 4 beschrieben, basieren die Heuristiken auf empirischen Untersuchungen im industriellen Umfeld, die über einen Zeitraum von vier Jahren stattfinden. Während dieses Zeitraums wird der C&C²-Ansatz in neun Entwicklungsprojekten, vier Diplomarbeiten, einer Schulung und in elf Workshops angewendet (siehe Abbildung 19).

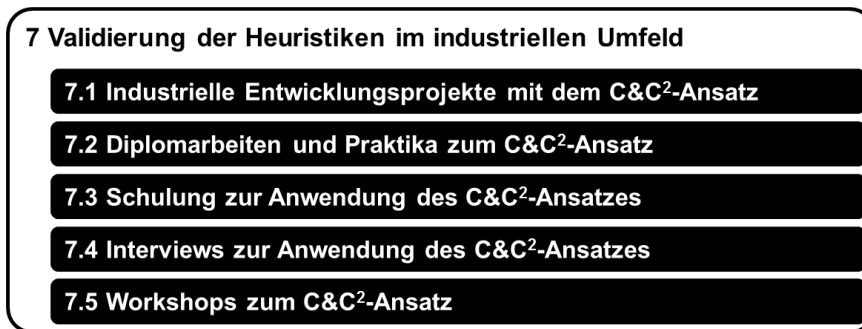


Abbildung 89: Aufbau dieses Kapitels

Ziel der Validierung ist, die Heuristiken auf ihre Nützlichkeit für die Anwendung des C&C²-Ansatzes bei Entwicklungs- bzw. Problemlösungsprojekten zu überprüfen. Helfen die Heuristiken, das Systemverständnis zu einem technischen System mit dem C&C²-Ansatz aufzubauen und in einem C&C²-Modell darzustellen?

Wie in Abbildung 90 dargestellt, werden die Heuristiken aus bewährten Vorgehensweisen beim Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz abgeleitet und definiert. Anschließend werden die Heuristiken in den folgenden Projekten, Diplomarbeiten, Workshops und Schulung angewendet, um zu validieren, ob die Heuristiken das Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz unterstützen. Kernfragen hierbei sind:

1. Helfen die Heuristiken, ein C&C²-Modell des technischen Systems aufzubauen, das alle für die Zielerreichung relevanten Verknüpfungen zwischen Gestalt und Funktion enthält?
2. Helfen die Heuristiken, die für die Zielerreichung relevanten Elemente des technischen Systems zu identifizieren, zu definieren und im C&C²-Modell abzubilden?

Wenn beide Anforderungen durch die Heuristiken bedient werden können, wird der Aufbau von Systemverständnis mit dem C&C²-Ansatz und damit der Mehrwert des C&C²-Ansatzes in der Produktentwicklung verbessert.

Die Basis der Validierung sind die Daten aus der Selbstbeobachtung, Beobachtung der Entwickler, retrospektive Befragungen der Entwickler und retrospektive Dokumente (siehe auch Abbildung 17). Es findet kein direkter Vergleich einer Probandengruppe ohne und einer Probandengruppe mit Heuristiken statt. Stattdessen werden Situationen mit und ohne Anwendung der Heuristiken verglichen. Es wird auch ausgewertet, ob die Anwender die Heuristiken als Hilfestellung für die C&C²-Anwendung und die Zielerreichung im Projekt beurteilen.

Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Heuristiken weiterentwickelt und wiederum angewendet und damit validiert. Jede Heuristik durchläuft somit mehrere Schleifen zwischen Weiterentwicklung und Validierung. Eine Heuristik muss sich mindestens in zwei Situationen im industriellen Umfeld für die Anwendung des C&C²-Ansatzes als hilfreich erweisen. Heuristiken, die sich nur in einer Situation bewähren, werden verworfen.

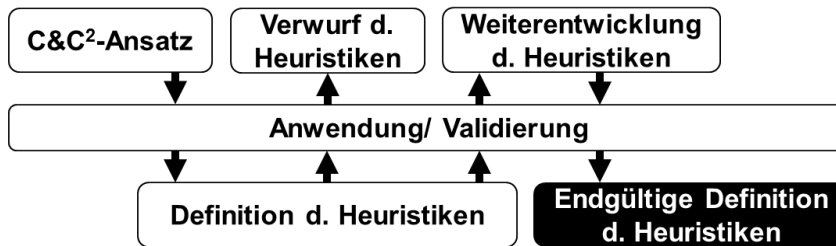


Abbildung 90: Definition und Validierung der C&C²-Heuristiken

Bei der Validierung der Heuristiken während der Anwendung des C&C²-Ansatzes, nimmt der Autor verschiedene Rollen ein:

- A (aktives Mitglied): Die Verwendung des C&C²-Ansatzes und der Heuristiken werden durch den Autor in die Projekte bzw. Workshops eingebracht, ohne dass die Anwender im C&C²-Ansatz und den Heuristiken im Vorfeld geschult werden. Der C&C²-Ansatz und die C&C²-Heuristiken werden hierbei an konkreten Beispiel erläutert, auch um Vorgehensweisen zu begründen und den Mehrwert des Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz und den Heuristiken aufzuzeigen. In diesen Fällen ist der Autor C&C²-Moderator³⁴⁶ und Mitglied des Entwicklungsteams.

³⁴⁶ C&C²-Moderator: methodischer Moderator zur Anwendung des C&C²-Ansatz

- M (Moderator): Die Teammitglieder der Projekte bzw. des Workshops werden im Vorfeld zum C&C²-Ansatz und den Heuristiken geschult. Hierfür wird den Anwendern eine explizite Formulierung der Heuristiken zur Verfügung gestellt.³⁴⁷ In diesen Fällen ist der Autor Moderator für die Anwendung des C&C²-Ansatzes, ohne Teil des Entwicklungsteams zu sein.
- V (Vermittler): Die Teammitglieder der Projekte bzw. des Workshops werden im Vorfeld zum C&C²-Ansatz und den Heuristiken geschult. Sie wenden den Ansatz selbstständig an. Hierfür wird den Anwendern eine explizite Formulierung der Heuristiken zur Verfügung gestellt. Der Autor nimmt keinen Einfluss als Teammitglied oder Moderator, sondern befragt und beobachtet die Teammitglieder zur Anwendung des C&C²-Ansatzes und der C&C²-Heuristiken.

Bei der Validierung sind gewisse Rahmenbedingungen vorgegeben. Die Teammitglieder in den Projekten haben unterschiedliche Wissensstände zum C&C²-Ansatz und den Heuristiken. Es gibt Projekte mit nur unerfahrenen Anwendern, Projekte mit nur erfahrenen Anwendern und Projekte mit heterogener Zusammenstellung aus erfahrenen und unerfahrenen Anwendern. Der Einfluss des Autors als Mitglied der Entwicklungsteams, als C&C²-Moderator und als Vermittler wird so weit wie möglich berücksichtigt, kann aber nie vollständig ausgeblendet werden. Die Heuristiken werden zu verschiedenen Zeitpunkten entwickelt und validiert. Es gibt keinen zeitlichen Schnittpunkt, der die Definitionsphase von der Validierungsphase der Heuristiken trennt. Da die Validierung im industriellen Umfeld stattfindet, ist die Zielsetzung des Industrieunternehmens immer priorisiert.

7.1 Industrielle Entwicklungsprojekte mit dem C&C²-Ansatz

Mit dem Ziel Anwendungswissen zum C&C²-Ansatz aufzubauen, ist die wichtigste Validierungsmethode, die Heuristiken in Entwicklungsprojekten³⁴⁸ im industriellen Umfeld (siehe Abbildung 91) anzuwenden und dies zu untersuchen.

Der C&C²-Ansatz und die C&C²-Heuristiken werden hierfür in neun Projekten angewendet. Die Anwendung des Ansatzes und der Heuristiken findet nicht zusätzlich

³⁴⁷ Bis auf die letzte Diplomarbeit standen den Anwendern nur die Heuristiken zum Modellaufbau bereit, die Heuristiken zur Modellbildung wurden in der Moderation vermittelt

³⁴⁸ Mit Entwicklungsprojekte sind in Anlehnung zu Kapitel 2.1 auch Problemlösungsprojekte gemeint

zu, sondern in den Aktivitäten der Produktentwicklung statt. Dies ist auch in der engen Verknüpfung der Heuristiken zur Modellbildung mit anderen Methoden zu erkennen: die Heuristiken sind sehr praxisnah definiert und zu jeder Heuristik ist auch mindestens ein Beispiel aufgeführt. Gleichzeitig können durch die hohe Anzahl an Anwendern in den verschiedenen Projekten die Heuristiken sehr anwender- und situationsneutral formuliert werden.

In Abbildung 91 ist beschrieben, wie viele Personen in den Projekten als Teammitglieder mitarbeiten und wie lange die Projekte dauern. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Projektsituationen: Planungssituationen und Notsituationen. In Planungssituationen wird ein Produkt bzw. ein Problem unter geplanten Umständen entwickelt. In Notsituationen wird der C&C²-Ansatz und die Heuristiken eingesetzt, um ein Problem zu lösen, das unerwartet auftaucht und unter sehr hohem Zeitdruck gelöst werden muss. In beiden Projektsituationen wird der C&C²-Ansatz eingesetzt, um genügend Systemverständnis für die Zielerreichung aufzubauen.

Projekte zeitlich geordnet	Rolle des Autors		Projektsituation	Ziel des Projektes	Anzahl beteiligter Personen	Dauer
	A - aktives Mitglied	M - Moderator				
Projekt 1	A & M		Planungssituation	Systemverständnis zum Produkt aufbauen	4	18 Monate
Projekt 2	A & M		Planungssituation	Entwicklung eines Produktes	4	5 Monate
Projekt 3		M	Notsituation	Problem im Produkt identifizieren u. lösen	2	1 Woche
Projekt 4	A & M		Notsituation	Problem im Produkt identifizieren u. lösen	7	3 Monate
Projekt 5	A & M		Planungssituation	Entwicklung eines Produktes	6	6 Monate
Projekt 6	M & V		Planungssituation	Entwicklung eines Produktes	3	6 Monate
Projekt 7		V	Notsituation	Problem im Produkt identifizieren u. lösen	5	2 Wochen
Projekt 8	M & V		Planungssituation	Entwicklung eines Produktes	4	2 Monate
Projekt 9	A & M		Planungssituation	Entwicklung eines Produktes	2	14 Monate

Abbildung 91: Übersicht zu den Projekten im industriellen Umfeld, in denen der C&C²-Ansatz mit den Heuristiken angewendet wird

Vorgehen

Da die Heuristiken während der Untersuchungen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes entwickelt werden, stehen am Anfang keine Heuristiken zur Verfügung. Erst nach der Definition der ersten Heuristiken beginnt die Validierung, indem die Heuristiken in Folgeprojekten angewendet werden. Die erarbeiteten Heuristiken werden den Anwendern nicht immer im Vorfeld vermittelt, sondern meistens durch den Autor in die Projekte eingebracht. Dies geschieht unabhängig davon, ob der Autor Mitglied des Entwicklungsteams oder Moderator zur Anwendung des C&C²-Ansatzes ist. Wie in der Einleitung von Kapitel 7 beschrieben, wird untersucht, ob die Heuristiken die Anwendung des C&C²-Ansatzes verbessern, also dem Anwender die notwendige

Hilfestellung bieten. Hierfür wird das Vorgehen beobachtet, Ergebnisse des Projektes analysiert und der Anwender befragt.

Ergebnisse

Abbildung 92 zeigt, welche Heuristiken in welchem Projekt erfolgreich angewendet werden. Erfolgreich heißt, dass die Heuristik die Anwendung des C&C²-Ansatzes in mindestens zwei Situationen verbessert, indem sie dem Anwender entweder bei Kernfrage 1 oder Kernfrage 2 unterstützt (schwarzes Kreuz in Abbildung 92). Heuristiken, die zu einer falschen Anwendung des C&C²-Ansatzes oder zu technisch falschen Ergebnissen führen, werden verworfen.

Auffällig ist, dass die Heuristiken zum Modellaufbau³⁴⁹ fast immer eingesetzt werden können, wogegen die Heuristiken zur Modellbildung³⁵⁰ große Unterschiede in der Häufigkeit ihrer Verwendung aufweisen.

Heuristiken		Kapitel	Anwendung in Projekt										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Heuristiken für den Modellaufbau (HMA)	Systemgrenze der Gestalt (SGG)	5,1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Systemgrenze der Zeit (SGZ)	5,2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Ort der Funktionserfüllung (ODF)	5,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Kammstruktur (KS)	5,4	X	X			X	X	X	X	X	X	X
Heuristiken für die Modellbildung (HMB)	Bestimmung von WFP	Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil	6.2.1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Oberflächenanalyse von Bauteilen	6.2.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Bildgebende Verfahren	6.2.3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		CAD Zeichnung und Skizzen	6.2.4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Simulationen	6.2.5		X		X	X					X
		Schnittmodelle durch WFP	6.2.6	X	X	X	X	X				X	X
		Vergrößern oder verkleinernde Prototypen	6.2.7	X	X		X						X
	Bestimmung von LSS	Versagensstellen	6.3.1	X	X		X	X				X	X
		Simulationen	6.3.2		X		X	X					X
		Kraft- und Spannungs-induzierende Materialien	6.3.3		X							X	
	Bestimmung von Funktionen	Anpassung der Geschwindigkeit	6.4.1	X	X	X		X	X	X	X		X
		Anhalten der Systemoperation	6.4.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Nachstellen von einzelnen Funktionen	6.4.3	X	X	X	X	X	X	X	X		X
		Eliminierung von Funktionsgestaltelementen	6.4.4	X	X	X	X	X			X	X	X
		Veränderung von Gestalteigenschaften	6.4.6	X	X		X	X				X	X
		Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften	durch mathematische Methoden	6.5.1	X	X			X			X	
	durch Variation der WFP Anzahl einer Funktion		6.5.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	mit vereinfachter Gestalt und Testmethoden		6.5.3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	durch Simulationsmethoden		6.5.4		X			X					X

Abbildung 92: erfolgreiche Anwendung der Heuristiken in den Industrieprojekten

Ein wichtiges Zwischenergebnis der Validierung in den Projekten ist, dass das Anwendungswissen in Form der Heuristiken zum Modellaufbau nicht ausreichend ist, um den C&C²-Ansatz im industriellen Umfeld anzuwenden. Viele Anwender haben den Bedarf an einer Hilfestellung, um C&C²-Elemente im technischen System zu

³⁴⁹ Siehe Kapitel 5

³⁵⁰ Siehe Kapitel 6

identifizieren und zu definieren. Speziell am Anfang einer Systemanalyse mit dem C&C²-Ansatz sind die Anwender hier oft überfordert. Um diesen Bedarf zu decken, werden die Heuristiken zur Modellbildung formuliert und auf ihre Nützlichkeit validiert. Die Heuristiken basieren teilweise auf bekannten Methoden in der Produktentwicklung, was die C&C²-Anwendung mit gewohnten Aktivitäten bzw. bekannten Vorgehensweisen in der Produktentwicklung kombinierbar macht. Dies trägt entscheidend zur Anwendbarkeit und Akzeptanz der Heuristiken und dementsprechend des C&C²-Ansatzes bei. Als besonders hilfreich erweisen sich die Heuristiken zur Quantifizierung der verknüpften Funktions- und Gestalteigenschaften. Die Ergebnisse sind für die Definition der Syntheseschritte von großer Bedeutung.

Die Heuristik „Systemgrenze der Gestalt“ macht die Anwendung des C&C²-Ansatzes effizienter, weil sie beim Modellaufbau hilft, den für die Zielerreichung relevanten Teil des technischen Systems zu identifizieren und im C&C²-Modell darzustellen. So hilft sie z.B. bei Beispielsystem 1 den relevanten Teil des technischen Systems mit Hilfe des C&C²-Ansatzes sehr schnell zu bestimmen³⁵¹ ohne wichtige Zusammenhänge zu übersehen. Die Analysen der Schraubenspitze im Vorfeld zu diesen Untersuchungen, haben die Schrauben als einzelnes Bauteil zum relevanten Teil des Systems definiert. Dadurch waren wichtige Erkenntnisse bezüglich der Funktionen während des Einschraubprozesses verloren gegangen.

Die Heuristik „Systemgrenze der Zeit“ hilft die für die Zielerreichung relevante Zeitperiode des technischen Systems zu identifizieren und im C&C²-Modell darzustellen. So kann z.B. der relevante Zeitabschnitt beim Bitspringen bestimmt werden. Die Heuristik gibt klare Hilfestellungen, wie die Operationen des technischen Systems zeitlich im C&C²-Modell erfasst und abgebildet werden können.³⁵² Vor der Anwendung des C&C²-Modells und der SGZ war die Ursache für das Bitspringen in Beispielsystem 1 (bei Schrauben mit Phillips Recess) unbekannt. Mit dem Sequenzmodell können die Funktionen und damit die wirkenden WFP, LSS und Connectoren definiert werden, die das Bitspringen verursachen.

Mit Hilfe der Heuristik „Kammvorgehen“ und „Ort der Funktionserfüllung“ kann das Beispielsystem 1 übersichtlich im C&C²-Modell dargestellt werden, indem die relevanten Teile sehr detailliert dargestellt, aber dennoch alle Wechselwirkungen über

³⁵¹ siehe Kapitel 5.1

³⁵² siehe Kapitel 5.2

wenig detaillierten Brücken zwischen den relevanten Teilen erfasst werden.³⁵³ So kann in Beispielsystem 1 der Zusammenhang zwischen den Wirkungen der WFP Spitze - Untergrund und den Wirkungen der WFP Bit - Recess aufgedeckt werden: ein Bitspringen führt zu Unterbrechungen des Einschraubvorganges.

Die Heuristiken zur Modellbildung helfen den Anwendern, WFP, LSS und Funktionen im technischen System zu identifizieren und miteinander zu verknüpfen. Das verbessert die Sicherheit der Anwendung des C&C²-Ansatzes, was wiederum die Analyse technischer Systeme beschleunigt und die Zielerreichung verbessert. Die Projekte, in denen diese Heuristiken nicht zur Verfügung stehen, zeigen, dass die Anwender Probleme haben Gestaltfunktionselemente zu identifizieren und brauchen daher mehr Zeit für die Analyse technischer Systeme.

Fazit: Die Heuristiken zum Modellaufbau und der Modellbildung beweisen mehrfach, dass sie helfen, den C&C²-Ansatz effizienter anzuwenden, dabei Systemverständnis aufzubauen und damit die Analyse des technischen Systems in den Projekten zu beschleunigen. Das wiederum beschleunigt die Zielerreichung in den Projekten.

7.2 Untersuchungen der Anwendung des C&C²-Ansatz in projektbegleitenden Arbeiten

Ziel der Diplomarbeiten und Praktika ist, die Heuristiken³⁵⁴ von Anwendern validieren zu lassen, die mit dem C&C²-Ansatz vertraut sind.

Vorgehen

Die Validierung der Heuristiken findet über eine Beobachtung durch den Autor und über eine Beurteilung der Heuristiken durch die Diplomanden und Praktikanten³⁵⁵ statt. Für die Diplomarbeiten werden Maschinenbaustudenten des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ausgewählt, da diese den C&C²-Ansatz aus den Lehrveranstaltungen des Institutes für Produktentwicklung (IPEK) kennen. Den Studenten wird innerhalb eines Projektes eine technische Aufgabenstellung gegeben,

³⁵³ siehe Kapitel 5.3 und 5.4

³⁵⁴ Der Begriff Heuristiken zur Anwendung des C&C²-Ansatzes wurde erst später geprägt, so dass in den Diplomarbeiten der Begriff nicht vorzufinden ist.

³⁵⁵ Explizit aufgeführt sind nur die Diplomanden, wobei während es Zeitraum der Untersuchung auch fünf Praktikanten betreut werden, die ebenfalls mit dem C&C²-Ansatz und den Heuristiken arbeiten

die mit dem C&C²-Ansatz bearbeitet werden sollen. Dabei wenden die Studenten bestehende Heuristiken an, beurteilen diese und entwickeln ggf. neue Heuristiken.

Ergebnisse

Die Diplomarbeiten sind ein wichtiger Baustein, um die Heuristiken zu validieren, weil die Studenten auf Grund ihrer Vorbildung keinen Lernaufwand haben, sich die Basisdefinition des C&C²-Ansatzes anzueignen. Sie können direkt mit der Anwendung des Ansatzes auf ihre Aufgabenstellung anfangen und dabei die Heuristiken anwenden und validieren.

In Abbildung 93 sind die Heuristiken mit einem Kreuz markiert, die in den einzelnen Diplomarbeiten erfolgreich angewendet werden. Erfolgreich heißt, dass die Heuristiken helfen, den C&C²-Ansatz anzuwenden und damit die Ziele in der Situation zu erreichen.

Heuristiken		Kapitel	Anwendung in DA				
			1	2	3	4	
Heuristiken für den Modellaufbau (HMA)	Systemgrenze der Gestalt (SGG)	5,1	X	X	X	X	
	Systemgrenze der Zeit (SGZ)	5,2	X	X	X	X	
	Ort der Funktionserfüllung (ODF)	5,3	X	X	X	X	
	Kammstruktur (KS)	5,4	X	X	X	X	
Heuristiken für die Modellbildung (HMB)	Bestimmung von WFP	Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil	6.2.1	X	X	X	X
		Oberflächenanalyse von Bauteilen	6.2.2	X	X	X	X
		Bildgebende Verfahren	6.2.3	X	X	X	X
		CAD Zeichnung und Skizzen	6.2.4	X	X	X	X
		Simulationen	6.2.5				
		Schnittmodelle durch WFP	6.2.6	X	X		X
		Vergrößernde oder verkleinernde Prototypen	6.2.7				
	Bestimmung von LSS	Versagensstellen	6.3.1	X	X	X	X
		Simulationen	6.3.2				
		Kraft- und Spannungs-induzierende Materialien	6.3.3	X			
	Bestimmung von Funktionen	Anpassung der Geschwindigkeit	6.4.1	X	X	X	
		Anhalten der Systemoperation	6.4.2	X	X	X	
		Nachstellen von einzelnen Funktionen	6.4.3	X	X	X	X
		Eliminierung von Funktionsgestaltelementen	6.4.4	X	X	X	X
	Verknüpfung von Funktions- und Gestalteeigenschaften	Veränderung von Gestalteeigenschaften	6.4.6	X	X	X	X
		durch mathematische Methoden	6.5.1	X	X		X
durch Variation der WFP Anzahl einer Funktion		6.5.2	X		X	X	
mit vereinfachter Gestalt und Testmethoden		6.5.3	X	X		X	
	durch Simulationsmethoden	6.5.4					

Abbildung 93: Verwendung und Validierung der Heuristiken in den Diplomarbeiten

Wie bei der Validierung der Heuristiken in den Projekten, fällt auch hier auf, dass die Heuristiken zum Modellaufbau in jeder Arbeit verwendet werden. Sie sind wichtige Hilfestellungen, um den relevanten Teil des technischen Systems und die relevante Zeitspanne in den Operationen des technischen Systems zu erfassen und im C&C²-Modell abzubilden. Bei den Heuristiken zur Modellbildung fällt auf, dass immer mindestens je eine Heuristik verwendet wird, um WFP, LSS und Funktionen im

technischen System zu identifizieren und auch zu quantifizieren. So können die relevanten Elemente des technischen Systems bestimmt und im C&C²-Modell quantitativ beschrieben werden.

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Diplomarbeiten aufgeführt:

In der Diplomarbeit 1 von THAU³⁵⁶ wird der allgemein formulierte Bedarf aufgezeigt, Hilfestellungen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes zu entwickeln. Sie reduzieren den Aufwand eine Vorgehensweise zu entwickeln, wie der C&C²-Ansatz auf eine konkrete Problemstellung oder ein Entwicklungsziel angewendet werden kann, z.B. wie WFP in technischen Systemen identifiziert werden können (siehe Kapitel 6.2). Hilfestellungen können die Bereitschaft den C&C²-Ansatz anzuwenden vergrößern. Auch können Heuristiken verhindern, dass ein C&C²-Modell falsch aufgebaut wird. So beschreibt THAU, dass z.B. die Systemgrenze falsch definiert wird und so eine Funktion einem Bauteil zugeschrieben wird. Mit den Heuristiken „Systemgrenze der Gestalt“ und „Ort der Funktionserfüllung“ könnte dieser Fehler vermieden werden. Die Analyse des Vorgehens während der Diplomarbeit führt zu den ersten Heuristiken zum Modellaufbau und Heuristiken zur Modellbildung.

In der Diplomarbeit 2 von SCHWERDTFEGER³⁵⁷ werden die Heuristiken zum Modellaufbau erfolgreich angewendet und als zielführend beurteilt. So wendet SCHWERDTFEGER z.B. die Heuristik zur Systemgrenze der Zeit an, um das technische System der Trockenbauschraube zeitlich zu beschreiben. Im C&C²-Modell ist beschrieben, welche WFP, LSS und Funktionen notwendig sind, um den Bit in den Recess der Schraube einzuführen und anschließend Anpresskraft und Drehmoment zu übertragen (siehe Abbildung 37). Das Modell beschreibt auch, zu welchem Zeitpunkt im technischen System ein Bitspringen auftreten kann (siehe Abbildung 39). Die Heuristiken zur Modellbildung können nur teilweise auf die Zielsetzung der Diplomarbeit übertragen werden. Z.B. werden die Heuristiken zur Identifizierung von WFP erfolgreich eingesetzt, wohingegen die Heuristiken zur Quantifizierung der Funktions- und Gestalteeigenschaften nur teilweise erfolgreich eingesetzt werden. Grund hierfür ist, dass die Gestalteeigenschaften und die Funktionseigenschaften nicht ausreichend genau bestimmt werden können. Es ist z.B. sehr schwer die Gestalt des

³⁵⁶ Vgl. Thau 2006

³⁵⁷ Vgl. Schwerdtfeger 2007

Recess ausreichend genau zu bestimmen und die Funktion „Recess springt im Bit“ auf einem Prüfstand reproduzierbar nachzubilden.

Diplomarbeit 3: MAUZ³⁵⁸ nützt den C&C²-Ansatz und die Heuristiken, um das technische System zu analysieren und das erworbene Systemverständnis darzustellen. Z.B. indem er mittels der Heuristik „Kammstruktur“ das technische Systems so erfasst, dass alle Wechselwirkungen abgebildet und gleichzeitig besonders relevanten Stellen detailliert dargestellt werden. Ein weiteres Beispiel ist die Heuristik „Systemgrenze der Zeit“. Diese nützt MAUZ, um die Operationen des technischen Systems zeitlich einzuteilen. So kann er für einzelne Funktion neue Ideen generieren bzw. bestehende Ideen strukturieren. Er kommt zu dem Schluss, dass der C&C²-Ansatz und die Heuristiken den Anwender unterstützen, das technische System zu analysieren.

BAUDY³⁵⁹ kann in seiner Arbeit (Diplomarbeit 4) auf bereits sehr ausgereifte Definitionen der Heuristiken zum Modellaufbau und zur Modellbildung zurückgreifen. Vor allem die Heuristiken zur Modellbildung führen zu einer Reihe wichtiger Analyseergebnissen und damit zu erfolgreichen Syntheseschritten am Produkt. Z.B. verwendet Baudy die Heuristiken „Bestimmung von WFP → Schnittmodelle“ und „Verknüpfung von Funktions- und Gestalteigenschaften → durch Variation der WFP Anzahl einer Funktion“, um die Dichtigkeit von Schraubverbindungen zu analysieren (siehe Abbildung 80).

Die Praktika werden innerhalb der Projekte, die in Kapitel 7.1 beschrieben sind, absolviert. Bestehende C&C²-Modelle helfen, den Studenten die technischen Systeme zu vermitteln. Anhand der Heuristiken können die Vorgehensweisen beim Arbeiten mit dem C&C²-Modell in den Projekten erklärt werden. Z.B kann so zu Beispielsystem 1 das Systemverständnis und die Vorgehensweise der Entwicklungsarbeit in kurzer Zeit vermittelt werden. Dies ist ein entscheidender Mehrwert, da immer wieder neue Studenten in diesem Projekt mitarbeiten, die mit Hilfe der Heuristiken den C&C²-Ansatz zielführend auf ihre Aufgabenstellung anwenden können.

Fazit: Die Diplomarbeiten und Praktika bestätigen die Hilfestellung, die die Heuristiken für die Anwendung des C&C²-Ansatzes bieten. Die Studenten können so mit Hilfe des C&C²-Ansatz ihre Ziele erreichen. Probleme bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes kommen dann auf, wenn für eine Anwendungssituation keine Heuristiken zur

³⁵⁸ Vgl. Mauz 2008

³⁵⁹ Vgl. Baudy 2010

Verfügung stehen. Durch die fortlaufende Neu- und Weiterentwicklung der Heuristiken, wird über die Zeit diese Lücke immer kleiner.

7.3 Schulung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes

Eine weitere Methode, um die Anwendung des C&C²-Ansatzes und der Heuristiken zu validieren, ist eine Schulung von 20 Mitarbeitern einer Entwicklungsabteilung eines Industrieunternehmens. Die Mitarbeiter dieser Abteilung besitzen keine Vorkenntnisse zu bzw. Erfahrungen mit dem C&C²-Ansatz. Das Ziel des Industrieunternehmens ist Entwicklungsprozesse zu beschleunigen und besser zu dokumentieren. Dafür sollen die Mitarbeiter das Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz innerhalb eines Tages soweit vermittelt bekommen, dass sie damit eigenständig in Entwicklungsprojekten arbeiten können. Inhalt der Schulung sind die C&C²-Basisdefinition und die C&C²-Heuristiken. Ziel des Autors ist zu validieren, ob sich die C&C²-Heuristiken positiv auf die Vermittlung des C&C²-Ansatzes auswirken und ob der Ansatz mit den Heuristiken nach einer eintägigen Schulung selbstständig angewendet werden kann.

Vorgehen

Die Schulung besteht aus vier Modulen mit einem Umfang von 1h bis 2h:

- In Modul 1 wird der C&C²-Ansatz mit den Definitionen der Elemente und Grundhypothesen vermittelt
- In Modul 2 werden die Heuristiken zum Modellaufbau und zur Modellbildung anhand von Beispielen aus einer anderen Abteilung des Industrieunternehmens dargestellt
- In Modul 3 wird die Anwendung des C&C²-Ansatzes in kleinen Gruppen geübt, dafür wird ein Fallbeispiel aus der zu schulenden Entwicklungsabteilung genutzt
- In Modul 4 werden die Ergebnisse von Modul 3 vorgestellt und die Vorgehensweisen diskutiert

Begleitend zur Schulung wird den Teilnehmern ein Handout ausgehändigt. Dies enthält die C&C²-Basisdefinition und die C&C²-Heuristiken zum Modellaufbau. Das Handout dient den Anwendern in Modul 3 und im Anschluss an die Schulung als Leitfaden zur Anwendung des C&C²-Ansatzes. Die Heuristiken zur Modellbildung sind im Handout nicht enthalten, werden aber teilweise in Modul 2 präsentiert und durch die Moderatoren in Modul 3 geschult. In Abbildung 94 ist dargestellt, welche Heuristiken in

der Schulung präsentiert und welche in den Übungen von den Teilnehmern angewendet werden.

Heuristiken		Kapitel	in Modul 1 & 2 präsentiert	in Modul 3 angewendet	
Heuristiken für den Modellaufbau (HMA)	Systemgrenze der Gestalt (SGG)	5,1	X	X	
	Systemgrenze der Zeit (SGZ)	5,2	X	X	
	Ort der Funktionserfüllung (ODF)	5,3	X	X	
	Kammstruktur (KS)	5,4	X	X	
Heuristiken für die Modellbildung (HMB)	Bestimmung von WFP	Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil	6.2.1	X	X
		Oberflächenanalyse von Bauteilen	6.2.2	X	
		Bildgebende Verfahren	6.2.3	X	X
		CAD Zeichnung und Skizzen	6.2.4	X	X
		Simulationen	6.2.5	X	
		Schnittmodelle durch WFP	6.2.6	X	
		Vergrößernde oder verkleinernde Prototypen	6.2.7	X	
	Bestimmung von LSS	Versagensstellen	6.3.1	X	X
		Simulationen	6.3.2	X	
		Kraft- und Spannungs-induzierende Materialien	6.3.3	X	
	Bestimmung von Funktionen	Anpassung der Geschwindigkeit	6.4.1	X	
		Anhalten der Systemoperation	6.4.2	X	X
		Nachstellen von einzelnen Funktionen	6.4.3	X	
		Eliminierung von Funktionsgestaltelementen	6.4.4	X	
		Veränderung von Gestalteigenschaften	6.4.6	X	
Verknüpfung von Funktions- und Gestalt- eigenschaften	durch mathematische Methoden	6.5.1	X		
	durch Variation der WFP Anzahl einer Funktion	6.5.2	X		
	mit vereinfachter Gestalt und Testmethoden	6.5.3	X		
	durch Simulationsmethoden	6.5.4	X		

Abbildung 94: präsentierte und angewendete Heuristiken in der Schulung

Die Validierung der C&C²-Heuristiken für die Vermittlung und die Anwendung des C&C²-Ansatzes findet durch die Diskussionsrunde in Modul 4, einem anonymen Fragebogen (siehe Abbildung 95) und durch Beobachtung der Teammitglieder in Modul 3 statt. Außerdem werden zwei Entwickler im Anschluss an diese Schulung bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes in ihrem Projekt begleitet. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 7.1 wiederzufinden.

Ergebnisse

Die Notenskala für die Bewertung der C&C²-Schulung auf dem Fragebogen (siehe auch Anhang) reicht von 1 bis 5, wobei 1 die beste Note ist. Die Fragen unterscheiden sich in ihren Zielsetzungen. Es wird nach der Didaktik der Schulung, dem Mehrwert des C&C²-Ansatzes (inkl. C&C²-Heuristiken) für Aktivitäten in der Produktentwicklung und der Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes (mit den C&C²-Heuristiken) gefragt.

Die Ergebnisse basieren auf der Auswertung des Fragebogens, den Aussagen aus der Diskussionsrunde und den Beobachtungen während des Workshops.

Fragen an die Schulungsteilnehmer 1 = sehr gut; 2 = gut/ eher ja; 3 = befriedigend/ neutral; 4 = ausreichend/ eher nein; 5 = mangelhaft/ nein	Note	Notenverteilung				
	Ø	1	2	3	4	5
Wie beurteilen Sie die Schulung insgesamt?	2.0	1	18	1	0	0
Wie beurteilen Sie die Referenten?	2.1	2	15	3	0	0
Wie beurteilen Sie den 1. Block: Einführung in den C&C ² -Ansatz?	3.4	0	2	9	9	0
Wie beurteilen Sie den 2. Block: C&C ² -Anwendung in der Nachbarentwicklungsabteilung?	1.6	10	8	2	0	0
Wie beurteilen Sie den 3. Block: Anwendung des C&C ² -Modellaufbau in der Gruppe?	1.9	6	11	2	1	0
Wie beurteilen Sie die Verständlichkeit der Inhalte?	2.1	4	12	4	0	0
Wie beurteilen Sie Art der Vermittlung?	2.1	1	17	2	0	0
Wie beurteilen Sie den Nutzen des Ansatzes in Ihrer täglichen Arbeit?	2.2	1	14	5	0	0
Wie beurteilen Sie den Nutzen des Ansatzes für das Arbeiten im Team?	1.6	8	12	0	0	0
Wie beurteilen Sie Chance, dass Sie und Ihr Team mit Hilfe des Ansatzes ein besseres Systemverständnis aufbauen können?	1.4	12	7	0	0	0
Hat der Workshop Ihr Interesse am C&C ² -Ansatz geweckt?	2.1	1	11	1	0	0
Sind Ihnen die wesentlichen Punkte des Ansatzes klar geworden?	1.6	10	8	1	0	0
Wäre Ihnen jetzt ungefähr klar, wie Sie den Ansatz anwenden können?	2.2	2	12	4	1	0
Würden Sie versuchen den C&C ² -Ansatz alleine anzuwenden?	3.1	2	3	3	4	2
Würden Sie den C&C ² -Ansatz in einer moderierten Gruppe anwenden?	1.6	8	6	1	0	0
Würden Sie anderen Entwicklern den C&C ² -Ansatz weiterempfehlen?	1.7	5	10	0	0	0

Abbildung 95: Bewertung der Schulung und des C&C²-Ansatzes im Fragebogen³⁶⁰

Didaktik der Schulung

Die Schulung wird insgesamt mit der Note 2,1 beurteilt. Auch die Referenten werden mit 2,1 gut bewertet. Der Unterschied in der Beurteilung von Modul 1 und 2 zeigt, dass Entwickler mehr an der Umsetzung des C&C²-Ansatzes interessiert sind, als an dem theoretischen Hintergrund. Kritisiert wird, dass die theoretischen Hintergründe in Modul 1 schwierig nachzuvollziehen sind, weil die Praxisbeispiele erst in Modul 2 präsentiert werden. Da aber die Fragen nach der „Verständlichkeit der Inhalte“, „Art der Vermittlung“ jeweils mit der Note 2,1 beurteilt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Inhalte der Schulung verständlich vermittelt werden und die Didaktik keinen negativen Einfluss auf die Validierung der Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes und der Heuristiken hat. Es kann festgehalten werden, dass die Basisdefinition des C&C²-Ansatzes (siehe Abbildung 9) unbedingt anhand von Beispielen vermittelt werden sollte.

Mehrwert des C&C²-Ansatzes (inkl. C&C²-Heuristiken) für Aktivitäten in der Produktentwicklung

Die Teilnehmer beurteilen die Frage, ob ihnen „die wesentlichen Punkte des C&C²-Ansatzes klar geworden“ sind mit der Note 1,6. Daraus lässt sich schließen, dass aus Sicht der Teilnehmer die wesentlichen Inhalte des C&C²-Ansatzes vermittelt werden. Den Nutzen des C&C²-Ansatzes für ihre tägliche Arbeit beurteilten sie mit der Note 2,2. Besonders positiv wird hier die Möglichkeit erwähnt, verschiedene Detaillierungs- und

³⁶⁰ Anzahl der befragten Personen: 20 (der C&C²-Ansatz wurde hier als C&CM bzw. Modell bezeichnet. Modul wurde als „Block“ bezeichnet)

Abstraktionsebenen kombinieren zu können (fraktaler Charakter des C&C²-Ansatzes). Dadurch können technische Systeme beliebig detailliert dargestellt werden, ohne gleichzeitig einen großen Arbeitsaufwand zu erzeugen. Der fraktale Charakter wird für die Analyse komplexer Systeme als besonders hilfreich beurteilt. Eine deutliche Stärke des C&C²-Ansatzes sehen die Teilnehmer im Nutzen des Modells für das Arbeiten im Team: Note 1,6. Diskussionsinhalte können mit C&C²-Modellen besser dargestellt werden, da es sowohl Funktion, als auch Gestalt darstellt. Die Elemente des C&C²-Ansatzes werden in diesem Zusammenhang als „Sprache“ und die Grundhypothesen in Kombination mit den Heuristiken als Hilfsmittel zur „Strukturierung von Diskussionen“ bezeichnet. Die oben angeführten Vorteile beim Arbeiten mit dem C&C²-Ansatz bzw. einem C&C²-Modell führen dazu, dass alle Diskussionspartner sehr schnell auf einem sehr hohen technischen Niveau diskutieren konnten, unabhängig von Ihren Vorkenntnissen zu dem technischen System. So wird die Möglichkeit, dass mit Hilfe des C&C²-Ansatzes im Team ein besseres Systemverständnis aufgebaut werden kann, mit der Note 1,4 beurteilt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Schulung Interesse am C&C²-Ansatz weckt (Note 2,1) und daher die Verwendung des C&C²-Ansatzes von den meisten Teilnehmern an andere Entwickler weiterempfohlen wird (Note 1,7). Die Auswertung des Fragebogens zeigt, dass die Teilnehmer der Schulung den C&C²-Ansatz verstehen. Ihnen ist klar, worin die Vorteile bestehen und wofür sie den C&C²-Ansatz einsetzen würden.

Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes bzw. Bewertung der Heuristiken

Die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes nach einem Tag Schulung wird sehr unterschiedlich beurteilt (sowohl in den Fragebogen, als auch in der Diskussionsrunde ist die Streuung in der Beurteilung sehr hoch). Die Frage, ob den Teilnehmern ungefähr klar ist, wie sie den C&C²-Ansatz anwenden können, wird mit der Note 2,2 bewertet. Damit ist davon auszugehen, dass die Heuristiken zur Anwendung verständlich und nachvollziehbar sind. Fast alle Teilnehmer würden „den C&C²-Ansatz in einer moderierten Gruppe“ anwenden (Note 1,6). Das liegt zum einen daran, dass die Teilnehmer eine Stärke des C&C²-Ansatzes bei Gruppenarbeiten sehen, zum anderen auch daran, dass mit dem Moderator eine geschulte Person für die Anwendung des C&C²-Ansatzes und den Heuristiken zur Verfügung steht. Letztes habe den Vorteil, dass „man sich voll auf technische Inhalte konzentrieren und keine

Kraft für die Anwendung³⁶¹ des C&C²-Ansatzes aufgebracht³⁶² werden muss. Der letzte Teil der Aussage beschreibt die Unsicherheit bei einer selbstständigen Anwendung des C&C²-Ansatzes ohne Moderator: Note 3,1 (zu beachten ist hier, dass die Schulung nur einen Tag lang war und keinerlei Vorkenntnisse zum C&C²-Ansatz und den Heuristiken bestand). Die Diskussion zeigt, dass die Unsicherheit auf dem Aufwand basiert, den die Schulungsteilnehmer darin sehen, sich mit der Anwendung des C&C²-Ansatzes auseinander zu setzen, um ihn auf konkrete Problemstellungen anwenden zu können. Die Heuristiken zum Modellaufbau, die den Anwendern im Handout zur Verfügung stehen, sind wichtige und nützliche Hilfestellungen. Trotzdem haben die Teilnehmer noch Bedarf an Hilfestellungen, um den C&C²-Ansatz ohne Moderator anzuwenden:

- Es sollte noch klarer herausgearbeitet werden, bei welchen Aktivitäten im Entwicklungsprozess der C&C²-Ansatz eingesetzt werden kann und bei welchen nicht
- Es werden Hilfsmittel zur Darstellung von C&C²-Modellen des technischen Systems gefordert, wie z.B. eine Software
- Eine wird eine Hilfestellung gefordert, die beschreibt wie im technischen System die Elemente (Funktionen, LSS und WFP³⁶³) des C&C²-Ansatzes identifiziert und definiert werden können (Funktionen, LSS und WFP³⁶⁴); hier wird speziell nach Hilfe für die Bestimmung der ersten Schritte beim Erstellen des C&C²-Modells gefragt

Die ersten beiden Punkte können als offene Themen für kommende Beiträge gesehen werden. Der letzte Punkt kann durch Heuristiken zur Modellbildung bedient werden. Eine wichtige Erkenntnis aus der Schulung ist, dass obwohl die Heuristiken zur Modellbildung in Modul 2 vorgestellt und teilweise in Modul 3 durch den Moderator in die Gruppenarbeiten eingebracht werden, die Heuristiken zur Modellbildung ebenfalls explizit formuliert zur Verfügung gestellt werden müssen. Die Anwender verlangen nach einer strukturierten Hilfestellung: wie kann in verschiedenen Situationen nach

³⁶¹ Im Sinne der Modellerstellung, da für diese die Heuristiken als Hilfestellung zur Verfügung stehen

³⁶² Zitat eines Schulungsteilnehmers

³⁶³ Connectoren waren zu der Zeit als der WS stattfand noch nicht definiert

³⁶⁴ Connectoren waren zu der Zeit als der WS stattfand noch nicht definiert

WFP, LSS und Funktionen gesucht werden, wie können Gestalt- und Funktionseigenschaften verknüpft werden, etc.

Zwischenfazit: Die Validierungsergebnisse der Schulung basieren auf der Anwendung ungeübter Anwender. Der C&C²-Ansatz und der potentielle Mehrwert des Ansatzes können innerhalb eines eintägigen Workshops vermittelt werden. Wichtig für die Vermittlung sind Beispiele aus der Produktentwicklung im industriellen Umfeld und dass die Anwender des C&C²-Ansatzes explizit formulierte Heuristiken zum Modellaufbau und zur Modellbildung zur Verfügung haben. Die Heuristiken zum Modellaufbau stellen alleine keine ausreichende Hilfestellung dar. Die Heuristiken zur Modellbildung müssen nach den verschiedenen Situationen strukturiert sein und anhand von Beispielen erklärt werden, um dem C&C²-Nutzer die Unsicherheit in der Anwendung des C&C²-Ansatzes zu nehmen.

7.4 Interviews zur Anwendung des C&C²-Ansatzes

Zielsetzung der Interviews ist eine Rückmeldung zum C&C²-Ansatz und den Heuristiken von dem Personenkreis zu bekommen, der in den Projekten damit arbeitet. Dafür werden aus zwei verschiedenen Abteilungen Entwickler, Gruppenleiter und Abteilungsleiter, außerdem jeweils zwei Gruppenleiter und Moderatoren aus dem Methodensupport des Industrieunternehmens interviewt. Bei den Interviews handelt es sich um qualitativ episodische Interviews.³⁶⁵ In den Interviews werden die Personen gezielt zu ihrem Wissen und ihren Erfahrungen in der Anwendung des C&C²-Ansatzes und der C&C²-Heuristiken befragt. In Abbildung 96 ist dargestellt, wie intensiv die einzelnen Interviewpartner mit den C&C²-Ansatz arbeiten. Das Niveau der Anwendung des C&C²-Ansatzes und der Heuristiken unterscheidet sich stark zwischen den Interviewpartnern. „Aktive Anwender“ verwenden den C&C²-Ansatz bei ihren Aktivitäten im Projekt, bauen selbstständig C&C²-Modelle auf und verwenden die Heuristiken. Im Gegensatz dazu wenden „passive Anwender“ den C&C²-Ansatz und die Heuristiken nur unter Anleitung eines Moderators an. „Nicht involvierte Anwender“ arbeiten nicht mit dem C&C²-Ansatz und den Heuristiken, nützten aber C&C²-Modelle und das darin dargestellte Systemverständnis.

³⁶⁵ Vgl. Lamnek 2005 auf S. 383

Bezeichnung	Niveau der Anwendung des C&C ² -Ansatzes und der Heuristiken
Autor	
Entwickler 1	
Methodenmoderator 1	aktiver Anwender
Entwickler 2	passiver Anwender
Entwickler 3	nicht involvierter Anwender
Entwickler 4	passiver Anwender
Entwickler 5	aktiver Anwender
Entwickler 6	passiver Anwender
Entwicklungsleiter 1	aktiver Anwender
Entwicklungsleiter 2	aktiver Anwender
Entwicklungsleiter 3	nicht involvierter Anwender
Entwicklungsleiter 4	nicht involvierter Anwender
Methodenmoderator 2	aktiver Anwender
Methodenmoderator 3	nicht involvierter Anwender
Methodenleiter 1	aktiver Anwender
Methodenleiter 2	nicht involvierter Anwender
aktiver Anwender	hat den C&C ² -Ansatz bei seinen Aktivitäten in den Projekten angewendet; erstellt C&C ² -Modelle; verwendet Heuristiken
passiver Anwender	hat in den Projekten den C&C ² -Ansatz nur mit Hilfe eines Moderators angewendet; nützt bestehende C&C ² -Modell bei seinen Aktivitäten
nicht involvierter Anwender	war nicht an Projekten beteiligt, in denen C&C ² -Ansatz angewendet wurde; nützt bestehende C&C ² -Modelle bei seinen Aktivitäten; kennt den C&C ² -Ansatz aus Präsentationen

Abbildung 96: interviewte Personen aus dem industriellen Umfeld

Zu beachten ist, dass es sich bei den Interviews um „Erfahrungsberichte“ der einzelnen Personen handelt. Die Ergebnisse sollen zum einen die Heuristiken zum C&C²-Ansatz validieren und zum anderen den Bedarf für weitere Hilfestellungen aufzeigen. Der Unterschied zu den anderen Validierungsmethoden ist, dass hier keine Beobachtung der Teilnehmer stattfindet, sondern nur die Antworten, bzw. Beurteilungen der Anwender ausgewertet werden.

Vorgehen

Die Interviews finden im Industrieunternehmen statt und werden in einer Zusammenarbeit zwischen dem IPEK³⁶⁶ und Frau Dr. ECKERT³⁶⁷ durchgeführt. Jede Person wird 30min bis 60min interviewt und dies mittels eines Audiogerätes aufgezeichnet. Anschließend werden die Aussagen der Interviewpartner anhand von Transkriptionen der Interviews auf folgende Kernfrage hin ausgewertet: Wie beurteilen die Interviewten die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes und der C&C²-Heuristiken?

Ergebnisse

Anmerkung: Wenn einer Person die Heuristiken nicht bekannt sind, werden sie auch nicht danach gefragt: „nicht abgefragt“. Wenn während der Diskussion festgestellt wird,

³⁶⁶ Institutsgruppe „Entwicklungsmethodik und –management“, der auch der Autor zugehörte

³⁶⁷ Department of Design, Open University, England

dass die Heuristiken unbekannt sind, aber der Bedarf der interviewten Person genau den Heuristiken entspricht, wird das mit „Bedarf festgestellt“ festgehalten.

was hinsichtlich	Beurteilung (sehr gut, gut, neutral, gering, kein)		
	C&C ² -Ansatz	Heuristiken zum Modellaufbau	Heuristiken für Modellbildung
	Mehrwert für Produktentwicklungsprojekt	Mehrwert für Anwendbarkeit des C&C ² -Ansatzes im	
Autor, Entw. 1; Methodenm. 1	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Entwickler 2	neutral	kein	gering
Entwickler 3	gut	nicht abgefragt	nicht abgefragt
Entwickler 4	sehr gut	sehr gut	gut
Entwickler 5	neutral	gut	sehr gut
Entwickler 6	gut	sehr gut	Bedarf festgestellt
Entwicklungsleiter 1	sehr gut	gut	sehr gut
Entwicklungsleiter 2	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Entwicklungsleiter 3	gut	neutral	Bedarf festgestellt
Entwicklungsleiter 4	gut	nicht abgefragt	nicht abgefragt
Methodenmoderator 2	sehr gut	gut	gut
Methodenmoderator 3	gut	Bedarf festgestellt	Bedarf festgestellt
Methodenleiter 1	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Methodenleiter 2	neutral	Bedarf festgestellt	nicht abgefragt

Abbildung 97: Beurteilung der interviewten Personen zu C&C²-Ansatz und Heuristiken

Wie in Abbildung 97 zu sehen, wird der C&C²-Ansatz von den befragten Personen mehrheitlich positiv beurteilt. Sie sehen den C&C²-Ansatz sehen als eine „Sprache“, „Instrument“, „Beschreibungsmodell“, „Hilfestellung“, „Hilfsmittel“, „Werkzeug“, „Ausdrucksmittel“ und „Informationsmittel“, um technische Systeme systematisch analysieren, mittels C&C²-Modellen darstellen und mit Teamkollegen kommunizieren zu können. Besonders positiv wird hervorgehoben, dass der C&C²-Ansatz zwingt Funktion und Gestalt zu verknüpfen und damit nicht über Bauteile, sondern über Zusammenhänge diskutiert wird. Entwickler, die den C&C²-Ansatz mit „neutral“ beurteilen, können als generell sehr methodenkritisch bezeichnet werden. Sie sehen den Mehrwert bei nur wenigen Projekten, da sie meist mit ihren eigenen methodischen Herangehensweisen die Ziele erreichen, bzw. die Probleme lösen können.

Die Heuristiken zum Modellaufbau werden durchschnittlich als eine gute Hilfestellung zur Anwendung des C&C²-Ansatzes gesehen. Wobei die Rückmeldung der Probanden zeigt, dass sie den Inhalt und die Hilfestellung dieser Heuristiken verstehen. Z.B. berichtet Entwicklungsleiter 1, dass er bei Analysen von Konkurrenzprodukten eine Systemgrenze der Zeit und der Gestalt definiert, um sich auf den wesentlichen Teil des Systems zu konzentrieren. Ein Teil der Personen, denen die Heuristiken zum

Modellaufbau unbekannt sind, fragen in den Interviews nach einer derartigen Hilfestellung.

Die Heuristiken zur Modellbildung werden mehrheitlich als „sehr gute“ oder „gute“ Hilfestellung bewertet. So wendet Entwicklungsleiter 1 z.B. die HMB „Oberflächenanalyse von Bauteilen“ an, um WFP zu identifizieren. Anschließend sucht er nach der Funktion und den anderen Gestaltfunktionsparameter der Funktion. Methodenmoderator 2 sagt, dass die Bereitstellung der Heuristiken ihn dazu gebracht hat den C&C²-Ansatz anzuwenden. Die Basisdefinition des C&C²-Ansatz alleine würde ihm zur Anwendung nicht reichen. Grund der positiven Bewertung der Heuristiken zur Modellbildung ist, dass die sie den intuitiven und bekannten Vorgehensweisen der Entwickler ähneln. Die Vorgehensweisen sind durch die Heuristiken explizit formuliert, werden daher bewusster angewendet und sind wiederholbar. Hier beschreibt Entwickler 4, dass ohne die Heuristiken zur Modellbildung die C&C²-Anwendung schwierig ist. Die Heuristiken zur Modellbildung haben ihm entscheidend geholfen, bei Beispielsystem 1 zwei Prüfstände abgleichen: erst durch die Verknüpfung der Funktionseigenschaften und der Gestalteigenschaften konnten die Unterschiede zwischen den Prüfständen bestimmt werden. Die Personen, die eine explizite Definition der Heuristiken zur Modellbildung nicht kennen, verlangen nach einer derartigen Hilfestellung.

Zwischenfazit: Der Mehrwert, den der C&C²-Ansatz mit seinen Definitionen und Grundhypothesen bietet, wird meist erkannt, aber die Anwendung des Ansatzes birgt noch zu viele Unsicherheiten. Drei Anwender sehen keinen Mehrwert des C&C²-Ansatz für ihre Entwicklungsaktivitäten. So gilt es festzuhalten, dass auch die interviewten Personen einen Bedarf zur Unterstützung bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes äußern. Acht von zehn Personen beurteilen die Heuristiken zum Modellaufbau als zielführende Hilfestellung, um ein technisches System mit dem C&C²-Ansatz zu analysieren und dazu ein C&C²-Modell aufzubauen. Sieben von acht Personen bestätigen, dass die Heuristiken zur Modellbildung helfen, WFP, LSS, Connectoren und Funktionen zu identifizieren, zu definieren und untereinander zu verknüpfen.

7.5 Workshops zum C&C²-Ansatz

Die Validierung der Heuristiken findet in Workshops [WS] im industriellen Umfeld und im universitären Umfeld statt (siehe Spalte 3 in Abbildung 98). Die Zielsetzung der Anwendung des C&C²-Ansatz und der C&C²-Heuristiken in den Workshops ist, zu

validieren, ob die Heuristiken für die Anwendung des Ansatzes in Gruppenarbeiten hilfreich sind.

In WS arbeiten mehrere Personen zusammen an einer Zielsetzung. Die Teilnehmerzahl in den WS liegt zwischen drei und 42 Teilnehmer, die Dauer der WS liegt zwischen einem und zehn Tagen. In den WS werden der C&C²-Ansatz und die C&C²-Heuristiken durch den Moderator erklärt und unter seiner Anleitung angewendet. Die Rolle des „Moderators“ nimmt der Autor ein. Die WS, in denen der Autor nicht in Entwicklungsaktivitäten involviert ist, sondern nur eine moderierende Funktion hat, sind mit einem „M“ markiert. In den WS, in denen der Autor auch Teil des Entwicklungsteams ist („aktives Mitglied“), sind mit einem „A & M“ versehen.

In Spalte 4 ist beschrieben, zu welchem Zweck der WS stattfindet. Bei WS im universitären Umfeld geht es darum, die Heuristiken in der Forschungsgruppe am IPEK anhand von Beispielsystemen anzuwenden und zu validieren. Bei den WS im industriellen Umfeld geht es darum, die Effizienz und die Resultate der WS zu verbessern. Der C&C²-Ansatz und die C&C²-Heuristiken werden nicht angewendet, um die Heuristiken zu validieren – dieses Ziel kann hier nur indirekt verfolgt werden.

Workshop zeitlich geordnet	Rolle des Autors A - aktives Mitglied M - Moderator	Umfeld und Projektsituation im Workshop	Ziel des Workshops	Anzahl beteiligter Personen	Dauer [Tage]
WS 1	A & M	industrielles Umfeld Planungssituation	Aufbau intersubjektives Systemverständnis	6	10
WS 2	A & M	industrielles Umfeld Notsituation	Problemlösung	3	2
WS 3	M	universitäres Umfeld	Heuristiken validieren	9	1
WS 4	A & M	industrielles Umfeld Notsituation	Problemlösung	8	6
WS 5	A & M	industrielles Umfeld Planungssituation	Aufbau intersubjektives Systemverständnis	4	2
WS 6	M	universitäres Umfeld	Heuristiken validieren	24	1
WS 7	A & M	industrielles Umfeld Notsituation	Problemlösung	5	3
WS 8	M	universitäres Umfeld	Heuristiken validieren	42	1
WS 9	M	industrielles Umfeld Planungssituation	Aufbau intersubjektives Systemverständnis	11	1
WS 10	M	universitäres Umfeld	Heuristiken validieren	21	1
WS 11	A & M	industrielles Umfeld Planungssituation	Aufbau intersubjektives Systemverständnis	4	3

Abbildung 98: Workshops in denen die Heuristiken validiert wurden

Vorgehen

Die Anwendung des C&C²-Ansatzes und der C&C²-Heuristiken in den WS wird durch den Autor beobachtet. Teilweise werden die Teilnehmer auch zum Arbeiten mit dem Ansatz und den Heuristiken vom Autor befragt.

WS im industriellen Umfeld - Teilnehmer: Entwickler, Entwicklungsleiter, Methodenmoderatoren

Die WS im industriellen Umfeld werden in verschiedenen Entwicklungsprojekten und Situationen durchgeführt. In Notsituationen geht es vor allem darum, ein akutes Problem im bestehenden technischen System so schnell wie möglich zu lösen, ohne durch die Veränderung des Systems neue Probleme zu verursachen. In Planungssituationen soll ein intersubjektives Systemverständnis im Team für die Entwicklung eines technischen Systems aufgebaut werden. Dies war im Vorfeld nur teilweise gelungen, da das Wissen über die technischen Systeme auf viele verschiedene Personen verteilt war und ein gemeinsames Kommunikationsmittel gefehlt hat: entweder wurden nur Details besprochen, oder der Detaillierungsgrad der Analyse blieb zu gering.

Zu den WS werden neben den Teammitgliedern des Entwicklungsteams auch Mitarbeiter außerhalb des Teams eingeladen, wie z.B. Experten. Falls vorhanden, werden zu Beginn der WS bestehende C&C²-Modelle des technischen Systems aus den Entwicklungsprojekten dazu verwendet, um alle WS Teilnehmer auf denselben Wissenstand hinsichtlich des technischen Systems zu bringen. Im WS werden der C&C²-Ansatz und die C&C²-Heuristiken dazu verwendet, das Vorgehen zu strukturieren und die nächsten Schritte zu definieren. Z.B. wird im Beispielsystem 1 die Systemgrenze der Zeit und die Systemgrenze der Gestalt im WS Team festgelegt, um den relevanten Teil des technischen Systems zu definieren. Einzelne Schritte, wie z.B. WFP durch Schliffe zu identifizieren (siehe Beispielsystem 1 in Abbildung 62 und Abbildung 63), werden teilweise von nur einer Person durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse im WS Team wieder zusammengeführt. Dabei werden WFP, LSS, Connectoren, Wirkungen und Funktionen verknüpft und so ein C&C²-Modell des technischen Systems aufgebaut. Auf diese Weise wird das Systemverständnis im Team aufgebaut und gleichzeitig dokumentiert. Dies ist der Schlüssel, um die Entwicklungsziele zu erreichen oder das Problem zu lösen.

WS im universitären Umfeld - Teilnehmer: wissenschaftliche Angestellte des IPEK, Entwickler und Entwicklungsleiter aus dem Industrieunternehmen

Die WS am IPEK werden veranstaltet, um die Anwendung des C&C²-Ansatzes und der C&C²-Heuristiken in einem Personenkreis zu validieren, der wissenschaftlich arbeitet. Im Fokus stehen dabei nicht die Problemlösung oder die Erreichung von Entwicklungszielen, sondern die Validierung der Definitionen und der methodische Reife der Heuristiken. Für die WS werden einfache Beispielsysteme vorbereitet. Anhand dieser Beispiele können die Heuristiken im WS angewendet werden. So wird z.B. im ersten WS ein Locher analysiert. Hierbei können die Heuristiken zum Modellaufbau und ein Teil der Heuristiken zur Modellbildung angewendet werden. Die Anwendung der Heuristiken wird durch Beobachtung der Teilnehmer, Analyse der im WS erstellten Dokumente und durch die Befragung der Teilnehmer analysiert und validiert.

Ergebnisse

Die WS im industriellen Umfeld zeigen, dass die C&C²-Heuristiken verständlich formuliert, in verschiedenen Projekten anwendbar und zielführend sind. Mit Hilfe der Heuristiken gelingt es in allen WS, die Teilnehmer dazu zu bringen, den C&C²-Ansatz anzuwenden. Welche Heuristiken in welchen WS angewendet werden, ist in Abbildung 99 dargestellt. Z.B. eignen sich die HMA sehr gut, das Modell in der Gruppe aufzubauen. Die Heuristiken zur Systemgrenze der Gestalt und der Zeit helfen im Team den relevanten Teil des technischen Systems zu definieren. So gelingt es in den WS zum Beispielsystem 1 (Schraube) die relevanten Orte der Funktionserfüllung (WFP I, II, III) in einem C&C²-Modell zusammenzuführen, obwohl diese hintereinander mit verschiedenen Gruppenzusammenstellungen analysiert werden. Der C&C²-Ansatz ermöglicht hier die Zusammenführung der relevanten WFP, LSS und Connectoren (die WFP zwischen Bit und Recess beeinflussen die WFP zwischen Spitze und Untergrund) mit den relevanten Zeitspannen (Kupplungsspringen, Bitspringen und den Einschraubprozess der Spitze in den Untergrund). Mittels des Kammvorgehens können in Beispielsystem 3 (Dübel) die Experten für das technische System direkt auf die besonders relevanten WFP und LSS im System hinweisen (Orte der Funktionserfüllung). Gleichzeitig werden die unerfahrenen Entwickler durch die Grundhypothese 2 dazu angeregt, nach allen WFP, LSS und Connectoren bei einer Funktion zu fragen. Dadurch werden beim Modellaufbau auch Wechselwirkungen erfasst, die von den Experten übersehen werden.

Die WS tragen wesentlich dazu bei, die Heuristiken genereller zu definieren, so dass sie besser auf verschiedene technische Systeme und Situationen übertragbar sind.

Grund hierfür sind die vielen verschiedenen Teilnehmer und die verschiedenen technischen Systemen, in denen die Heuristiken in den WS angewendet werden.

Heuristiken		Kapitel	Anwendung im WS												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Heuristiken für den Modellaufbau (HMA)	Systemgrenze der Gestalt (SGG)	5,1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Systemgrenze der Zeit (SGZ)	5,2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Ort der Funktionserfüllung (ODF)	5,3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Kammstruktur (KS)	5,4	X		X	X		X		X		X	X	X	X
Heuristiken für die Modellbildung (HMB)	Bestimmung von WFP	Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil	6.2.1	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Oberflächenanalyse von Bauteilen	6.2.2	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Bildgebende Verfahren	6.2.3	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X
		CAD Zeichnung und Skizzen	6.2.4	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Simulationen	6.2.5	X			X							X	X
		Schnittmodelle durch WFP	6.2.6	X	X		X	X			X	X	X	X	X
		Vergrößern oder verkleinernde Prototypen	6.2.7	X			X								X
	Bestimmung von LSS	Versagensstellen	6.3.1	X			X	X			X	X	X	X	X
		Simulationen	6.3.2	X			X					X	X	X	X
		Kraft- und Spannungs-induzierende Materialien	6.3.3	X											X
	Bestimmung von Funktionen	Anpassung der Geschwindigkeit	6.4.1	X	X			X		X					
		Anhalten der Systemoperation	6.4.2	X	X		X	X		X					X
		Nachstellen von einzelnen Funktionen	6.4.3	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Eliminierung von Funktionsgestaltelementen	6.4.4	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Veränderung von Gestalteeigenschaften	6.4.6	X	X		X							X	X
		Verknüpfung von Funktions- und Gestalteeigenschaften	durch mathematische Methoden	6.5.1	X										
durch Variation der WFP Anzahl einer Funktion			6.5.2	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
mit vereinfachter Gestalt und Testmethoden			6.5.3	X			X	X			X			X	X
durch Simulationsmethoden			6.5.4	X											X

Abbildung 99: Anwendung der Heuristiken in den Workshops

Die WS im universitären Umfeld (Nummer des WS schwarz hinterlegt) helfen die Definitionen der Heuristiken mit den Basisdefinitionen des C&C²-Ansatzes abzugleichen. Manche Heuristiken widersprechen Anfangs den Definitionen der C&C²-Elemente und den Grundhypothesen. Die Diskussionen in den WS sind hier ein wichtiger Beitrag, um die Heuristiken korrekt zu definieren. Ein Beispiel hierfür ist die Definition der Heuristik „Systemgrenze der Gestalt“. Im industriellen Umfeld wird ein Bedarf festgestellt, einen Teil des technischen Systems in den Fokus der Analyse zu stellen. So wird die Systemgrenze zunächst mit „Freischnitten“ bzw. „künstlichen WFP“ realisiert (siehe Kapitel 5.1). In den WS im universitären Umfeld wird herausgearbeitet, dass dies dem C&C²-Basisansatz widerspricht. Aus diesen Diskussionen wird schließlich der „Connector“ entwickelt und die Heuristik „Systemgrenze der Gestalt“ damit definiert.

Zwischenfazit: Die Ergebnisse aus den C&C²-WS sind ein wichtiger Beitrag, um die Übertragbarkeit der C&C²-Heuristiken auf verschiedene technische Systeme zu verbessern und Lücken in der Hilfestellung zu schließen. Die Ergebnisse zeigen, dass die C&C²-Heuristiken eine entscheidende Hilfestellung darstellen, um den C&C²-Ansatz beim Arbeiten im Team anzuwenden. Die WS im universitären Umfeld helfen die Heuristiken mit der Forschung zum C&C²-Ansatz abzustimmen und korrekt zu definieren.

7.6 Fazit zur Validierung

Die Ergebnisse der Validierung basieren auf verschiedenen Methoden im industriellen Umfeld: die C&C²-Heuristiken werden durch die Anwendung in Produktentwicklungsprojekten in zwei verschiedenen Entwicklungsabteilungen, durch Diplomarbeiten, durch eine Schulung, durch Interviews und durch die Anwendung in Workshops validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die C&C²-Heuristiken einen wichtigen Beitrag dazu leisten können, die Anwendung des C&C²-Ansatzes zu verbessern. Des Weiteren helfen sie das Anwendungswissen zu vermitteln. Dadurch verbessern die C&C²-Heuristiken den Mehrwert, den der C&C²-Ansatz in der Produktentwicklung bietet. Sowohl die Heuristiken zum Modellaufbau, als auch die Heuristiken zur Modellbildung sind wichtige Hilfestellungen, um ein C&C²-Modell gemäß der Definitionen und Grundhypothesen aufzubauen und die Gestaltfunktionselemente und Funktionen des technischen System im C&C²-Modell abzubilden. Die C&C²-Heuristiken helfen:

- den für die Zielerreichung relevanten Teil des technischen Systems zu identifizieren und im C&C²-Modell darzustellen
- die relevanten Elemente (WFP, LSS, Connectoren, Wirkungen, Funktionen) im technischen System zu identifizieren und zu definieren
- bei dynamischen Systemen, die für die Zielerreichung relevante Zeitperiode des technischen Systems zu identifizieren und im C&C²-Modell darzustellen
- auch komplexe Systeme in einem C&C²-Modell zielführend darzustellen, indem der fraktale Charakter des C&C²-Ansatzes ausgenützt wird, um einerseits relevante Elemente sehr detailliert und andererseits Zusammenhänge zu erfassen
- weder Gestalt noch Funktion oder einzelne Bauteile isoliert zu betrachten
- qualitatives als auch quantitatives Systemverständnis aufzubauen und zu verknüpfen

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit ist, die Anwendung des C&C²-Ansatzes zu untersuchen und daraus Anwendungswissen zu entwickeln. Der C&C²-Ansatz wird dazu bei der Problemlösung und Entwicklung technischer Systeme im industriellen Umfeld angewendet. Während der empirischen Untersuchungen wird die Anwendung des C&C²-Ansatz in neun Projekten, vier Diplomarbeiten und elf Workshops (insg. 62 Anwendern) untersucht. Der Fokus liegt dabei in der Analyse technischer Systeme, da sie die Basis für jede Problemlösung und Entwicklung technischer Systeme ist.

Die Vorteile bzw. der Mehrwert, den der C&C²-Ansatz bei der Analyse technischer Systeme bieten kann, wird durch die Anwender erkannt und in den Projekten genützt. Gleichzeitig wird ein Bedarf für eine Hilfestellung bei der Anwendung des C&C²-Ansatzes festgestellt.

Um diesen Bedarf zu bedienen und Anwendungswissen bereitzustellen, werden aus den erfolgreichen Vorgehensweisen C&C²-Heuristiken entwickelt. Die C&C²-Heuristiken in dieser Arbeit beinhalten Anwendungswissen, wie der C&C²-Ansatz auf Problemstellungen bzw. die Entwicklung technischer Systeme angewendet werden kann. Die Heuristiken helfen eine zielgerichtete Analyse des technischen Systems durchzuführen, indem sie beschreiben, wie ein C&C²-Modell erstellt werden kann. Die Erstellung eines C&C²-Modells fördert den Aufbau eines qualitativ-quantitativen und intersubjektiven Systemverständnisses.

Die Anwendung des C&C²-Ansatzes im industriellen Umfeld zeigt, dass zwei verschiedene Heuristiken notwendig sind, um ein C&C²-Modell zu erstellen:

- Heuristiken zum Modellaufbau helfen C&C²-Modelle gemäß den Grundhypothesen und Definitionen aufzubauen; die Heuristiken beschreiben, wie die Elemente des C&C²-Ansatzes strukturiert verknüpft bzw. angeordnet werden können
- Heuristiken zur Modellbildung beschreiben, wie Funktionen und Gestaltfunktionselemente in dem technischen System identifiziert und definiert werden können; außerdem beschreiben sie, wie qualitatives und quantitatives Systemverständnis verknüpft werden können

Die Validierung der Heuristiken findet ebenfalls in Projekten, Diplomarbeiten, Workshops, aber auch durch eine Schulung und Interviews der Anwender statt. Die

Anwender, denen die Heuristiken zum Modellaufbau und zur Modellbildung zur Verfügung stehen, haben den C&C²-Ansatz im industriellen Umfeld effektiv und effizient einsetzen können. Besonders stark ist dieser Mehrwert in Gruppen, in denen ein intersubjektives Systemverständnis aufgebaut wird.

Als Beweis für diese Behauptung kann der Erfolg der Hilti Schraubtechnik herangezogen werden. Das junge Team wurde mit dem „Hilti Innovationspreis“³⁶⁸ ausgezeichnet. Teil des Innovationspreises ist die Schraube S-MS 01 Z 4.8x20, die in nur drei Jahren entwickelt wurde, obwohl das technische System für das Team und die Firma neu war. Die Entwicklung dieser Schraube basierte auf dem Systemverständnisaufbau zur selbstpenetrierenden Schrauben, wobei die Verwendung des C&C²-Ansatzes eine entscheidende Hilfestellung für das Team darstellte.

8.1 Anwendung der Heuristiken

Die Heuristiken zum Modellaufbau und zur Modellbildung sind als eine Reihe von **möglichen Vorgehensweisen** zu verstehen. Sie sind **nicht vollständig** und müssen ggf. für neue Situation **angepasst** oder **weiterentwickelt** werden. Es ist nicht Ziel der Heuristiken obligatorische Vorgaben zu machen oder Automatismen vorzustellen. Die Heuristiken sollten nur angewendet werden, wenn sie zweckdienlich sind. Dabei sollen sie den Anwender dazu anregen, die vorgeschlagenen Vorgehensweisen in den Heuristiken selbstständig weiter zu entwickeln und sich dabei auch von den Formulierungen und Definitionen der Heuristiken zu lösen.³⁶⁹ Ein zielführendes Modell stellt nur die relevanten Elemente dar und strebt keine Vollständigkeit an. Das beste Modell, ist das Einfachste, mit dem das Ziel erreicht werden kann.³⁷⁰

³⁶⁸ Der Martin Hilti Innovationspreis wurde anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. Martin Hilti im Jahr 1985 gestiftet. Er soll die Bedeutung der Innovation für die Zukunft der Unternehmensgruppe betonen und die Teamarbeit sowie den internationalen Austausch von Knowhow als Mittel und Weg zum Erfolg fördern. Mit dem Preis wird jährlich eine Mitarbeiter-Gruppe ausgezeichnet, welche durch einen außergewöhnlichen, innovativen Vorschlag Impulse für eine wichtige Neuerung in der Unternehmensgruppe gegeben hat. Für die Bewertung der Vorschläge werden im Rahmen der unternehmensstrategischen Zielsetzung folgende Kriterien herangezogen: Originalität, Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit, Bedürfnisse der Kunden, Internationalität und Unternehmenskultur

³⁶⁹ Vgl. Dörner 1979

³⁷⁰ Abgewandelter Grundsatz von Albers: „Die beste Lösung ist die Einfachste die funktioniert.“

8.2 Persönliche Anmerkung

Worin besteht die Herausforderungen und vor allem was führt zum Erfolg der Projekte, in denen der C&C²-Ansatz angewendet wird? Der Kern des Erfolges besteht nicht darin, durch kreative Lösungsansätze das System möglichst stark zu verändern und damit zu verbessern. Der entscheidende Erfolgsfaktor ist ein zielführendes Systemverständnis zum bestehenden technischen System. Scheinbar einfache Systeme wie eine Schraube oder ein Dübel können erst dadurch erfolgreich (weiter-) entwickelt werden, wenn ein ausreichendes Verständnis darüber erworben wird, wo die Funktionen stattfinden und wie sie optimiert werden können. Dabei geht es nicht darum, das System so detailliert wie möglich darzustellen, sondern genau so weit, wie es die Zielerreichung erfordert.

Fazit zur Anwendung des C&C²-Ansatzes nach fünf Jahren in der Produktentwicklung

Bei der Problemlösung und Entwicklung technischer Systeme ist die Analyse ein entscheidender Schritt. Dabei sind Modellerstellung und Systemverständnisaufbau unabdingbare und untrennbare Prozesse.

Der Mehrwert des C&C²-Ansatzes kann nur genutzt werden, wenn während dem Aufbau des Systemverständnisses ein C&C²-Modell erstellt wird. Die C&C²-Heuristiken bieten hier eine Hilfestellung, um den C&C²-Ansatz in den Aktivitäten der Analyse (und Synthese) anzuwenden.

Die Erfahrung aus den Untersuchungen zeigt, dass der C&C²-Ansatz, zusammen mit den C&C²-Heuristiken in der industriellen Umgebung einen deutlichen Mehrwert für die Analyse technischer System darstellt.

8.3 Offene Themen und Ausblick

Die Untersuchungen zur Anwendung des C&C²-Ansatzes zeigen offene Themenfelder auf:

- Potenzial ist noch in der Handhabung des C&C²-Modells feststellbar. Die Anforderung ist hier, eine Hilfestellung zur Darstellung der Gestalt und der Funktionen des technischen Systems zu erarbeiten. Die Darstellung muss einfach und schnell aufzubauen und zu verändern sein. Die Anwender fordern hierfür z.B. eine Software.

- Die Definition bzw. Differenzierung zwischen Gestalteeigenschaften der WF und der LSS kann als herausfordernd bezeichnet werden. Eine eindeutige Definition wäre hier für die Anwendung des C&C²-Ansatzes zielführend.
- Wie können Connectoren in die Verknüpfung von Funktions- und Gestalteeigenschaften, sprich bei der quantitativen C&C²-Modellbildung berücksichtigt werden?
- Wie können die Heuristiken auf eine Neuentwicklung, die nicht auf bestehende technische Systeme basieren, übertragen werden?

9 Anhang

9.1 Übersicht zu allen Heuristiken

Heuristiken für den C&C²-Modellaufbau (HMA)

- 5.1 Systemgrenze der Gestalt [SGG]
- 5.2 Systemgrenze der Zeit: Zustand und Sequenz [SGZ]
- 5.3 Ort der Funktionserfüllung [ODF]
- 5.4 Kammstruktur [KS]
- 5.5 Bestandteile eines C&C²-Modells
- 5.6 Fazit zu den HMA

Heuristiken für die C&C²-Modellbildung (HMB)

- 6.1 Orientierung bei der Modellbildung
- 6.2 Identifizierung bzw. Bestimmung von WFP
 - 6.2.1 Bestimmung möglicher WF auf einem Bauteil
 - 6.2.2 Oberflächenanalysen von Bauteilen
 - 6.2.3 Bildgebende Verfahren
 - 6.2.4 CAD Zeichnungen und Skizzen
 - 6.2.5 Simulationen
 - 6.2.6 Schnittmodelle durch WFP
 - 6.2.7 Vergrößernde oder verkleinernde Prototypen
- 6.3 Identifizierung bzw. Bestimmung von LSS
 - 6.3.1 Versagensstellen
 - 6.3.2 Simulationen
 - 6.3.3 Kraft- und Spannungs- induzierende Materialien
- 6.4 Identifizierung bzw. Bestimmung von Funktionen
 - 6.4.1 Zeitlich veränderte Betrachtungen der Systemoperationen
 - 6.4.2 Anhalten der Systemoperationen
 - 6.4.3 Nachstellen einzelner Funktionen
 - 6.4.4 Eliminierung aller irrelevanten WFP bzw. LSS
 - 6.4.5 Eliminierung des relevanten WFP bzw. LSS
 - 6.4.6 Veränderung der Eigenschaften der WFP bzw. LSS
- 6.5 Verknüpfung von Funktions- und Gestalteeigenschaften
 - 6.5.1 Verknüpfung durch mathematische Methoden
 - 6.5.2 Verknüpfung durch Variation der WFP Anzahl
 - 6.5.3 Verknüpfung mit vereinfachter Gestalt des Systems
 - 6.5.4 Verknüpfung durch Simulationsmethoden

Abbildung 100: Übersicht zu allen Heuristiken

9.2 Fragebogen und Auswertung der C&C²-Schulung

C&CM Schulung

Lehrmodul für Hilti DE



5 Fragebogen

1 = sehr gut/ ja; 2 = gut/ eher ja; 3 = befriedigend/ neutral; 4 = ausreichend/ eher nein; 5 = mangelhaft/ nein

- Wie beurteilen Sie die Schulung insgesamt?
- Wie beurteilen Sie die Referenten?
- Wie beurteilen Sie den 1. Block: Einführung in das C&CM Modell?
- Wie beurteilen Sie den 2. Block: C&CM Anwendung in der Schraubtechnik?
- Wie beurteilen Sie den 3. Block: Anwendung des C&CM - Modellaufbau in der Gruppe?
- Wie beurteilen Sie die Verständlichkeit der Inhalte?
- Wie beurteilen Sie Art der Vermittlung?
- Wie beurteilen Sie den Nutzen des Modells in Ihrer täglichen Arbeit?
- Wie beurteilen Sie den Nutzen des Modells für das Arbeiten im Team?
- Wie beurteilen Sie Chance, dass Sie und Ihr Team mit Hilfe des Modells ein besseres Systemverständnis aufbauen können?
- Sind Ihnen die wesentlichen Punkte des Modells klar geworden?
- Wäre Ihnen jetzt ungefähr klar, wie Sie das Modell anwenden können?
- Welche Teile der Schulung waren zu lange und welche zu kurz?
- Wo sehen Sie noch Bedarf an Informationen/ Lücken in der Schulung?
- Hat der Workshop Ihr Interesse an C&CM geweckt?
- Würden Sie versuchen das C&CM alleine anzuwenden?
- Würden Sie das C&CM in einer Moderierten Gruppe anwenden?
- Würden Sie anderen Entwicklern das Modell weiterempfehlen?
- Würden Sie weitere Informationen zum C&CM einholen?
- Würden Sie gerne an weitere WS zum C&CM teilnehmen?
- Was war das Beste am Workshop?
- Was war das Negativste am Workshop?

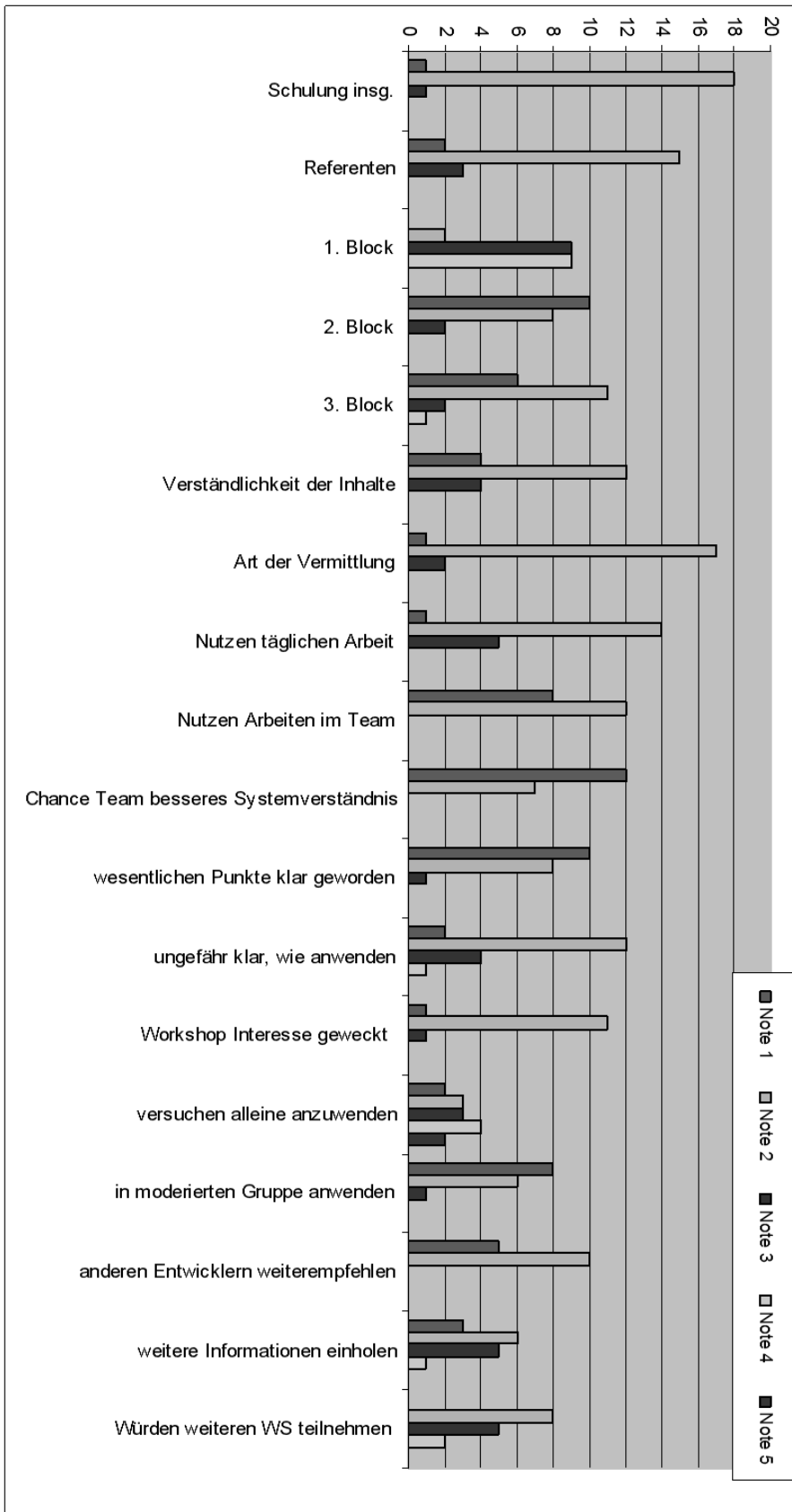


Abbildung 102: Notenverteilung zum Fragebogen der C&C²-Schulung

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sinkende Innovationsleistung in Unternehmen.....	1
Abbildung 2: radikale und inkrementelle Innovation nach Debus	3
Abbildung 3: Aufbau dieser Arbeit.....	9
Abbildung 4: Aufbau dieses Kapitels.....	10
Abbildung 5: Not- und Planungssituation nach ALBERS.....	11
Abbildung 6: Produktmodelle und Ihre Möglichkeit abstrakte Funktionen und konkrete Gestalt in verschiedenen Detaillierungsstufen darzustellen	17
Abbildung 7: der Gestaltungsprozess läuft nach Feldhusen auf zwei Ebenen ab.....	19
Abbildung 8: qualitatives und quantitatives Systemverständnis durch Verknüpfung von Gestalt und Funktion, bzw. von Eigenschaften der Funktion und der Gestalt.....	21
Abbildung 9: Produktentwicklung bzw. Problemlösung mit dem C&C ² -Ansatz	27
Abbildung 10: Darstellung der Funktion „Anpresskraft zwischen Füßen übertragen“ bei einem Pressball im Fußball.....	31
Abbildung 11: Handlungsrahmen beim Arbeiten mit dem C&C ² -Ansatz zur Problemlösung.....	37
Abbildung 12: Aktivitäten zur Lösung von Gestaltungsproblemen mit dem C&C ² -Ansatz	38
Abbildung 13: Systematische Gestaltungssynthese nach Lemburg	39
Abbildung 14: rechnerbasiertes Datenmodell für den C&C ² -Ansatz bei der Gestaltgebung technischer Systeme.....	41
Abbildung 15: Beispiel, warum Heuristiken zielführender sein können, als eine genaue Lösungsfindung	47
Abbildung 16: Ziel dieser Arbeit ist Anwendungswissen für den C&C ² -Ansatz zu erarbeiten (Beschreibung: Vergleiche Kapitel 2.3 bzw. Abbildung 9)	56
Abbildung 17: Methoden zur Daten bzw. Informationsgewinnung in dieser Arbeit.....	59
Abbildung 18: Forschungsmethode dieser Arbeit besteht aus iterativen Schleifen zwischen Anwendung, Analyse bzw. Validierung und Entwicklung der Heuristiken	63
Abbildung 19: Zeitstrahl und Forschungsaktivitäten dieses Beitrages	65

Abbildung 20: System der Schraube beim und nach dem Setzvorgang – Schraube [3] verbindet zwei Untergründe [4] – verschiedene Schraubenspitzen	67
Abbildung 21: System des Standsetzgerätes beim Setzvorgang	69
Abbildung 22: System des Dübels beim Befestigen von Bauteilen.....	70
Abbildung 23: Aufbau dieses Kapitels - Heuristiken zum C&C ² -Modellaufbau (HMA) .	72
Abbildung 24: Mögliche Anordnung der C&C ² -Elemente WFP, LSS, Systemgrenze (der Gestalt) und Connectoren zur Darstellung einer Funktion.....	73
Abbildung 25: Beispielsystem 1 – Setzen einer Schraube durch einen Anwender oder Prüfstand	75
Abbildung 26: Verkleinerung der Systemgrenze zur Analyse einer Funktion und im speziellen einer Wirkung in einem WFP.....	76
Abbildung 27: Vergrößerung der Systemgrenze für die Analyse im WFP I.....	77
Abbildung 28: zweite Vergrößerung der Systemgrenze aufgrund einer Detaillierung in WFP II	77
Abbildung 29: dritte Vergrößerung der Systemgrenze auf Grund einer Detaillierung in WFP III	78
Abbildung 30: originale Darstellung des C&C ² -Modells einer Schraube beim Einschraubvorgang.....	79
Abbildung 31: schematische Darstellung – zeitliche Struktur eines dynamischen C&C ² -Modells	81
Abbildung 32: schematische Darstellung - eine geometrische Detaillierung bringt oft eine zeitliche Detaillierung des C&C ² -Modells mit sich.....	83
Abbildung 33: Schematische Darstellung - Wechselwirkungen der Funktionen und Gestaltfunktionselemente der einzelnen Zustände bzw. Sequenzen.....	84
Abbildung 34: eine mögliche Sequenz des WFP Spitze – Untergrund beim Einschraubprozess	85
Abbildung 35: Zustand 1 und 2 des Sequenzmodells bei WFP I – durch die Detaillierung werden daraus viele WFP und dazugehörige LSS, Funktionen in verschiedenen Zuständen.....	86

Abbildung 36: WFP, LSS und damit Funktionen können unterschiedlich lange existieren	87
Abbildung 37: ideale Sequenz am WFP II - zwischen Bit und Recess	88
Abbildung 38: schematische Darstellung der Sequenz des Bitspringens zwischen Recess u. Bit	88
Abbildung 39: Funktionen im WFP II beeinflussen die Funktionen in WFP I – sie verlangsamen oder stoppen die Funktionen im den Zuständen der Sequenz an WFP I	89
Abbildung 40: Orte der Funktionserfüllung im Beispiel der der Schraubenoptimierung	92
Abbildung 41: schematische Darstellung - Kammartige Detaillierungsstruktur eines C&C ² -Modells	94
Abbildung 42: Kammartige Detaillierungsstruktur des C&C ² -Modells des Schraubenbeispiels	96
Abbildung 43: System 1 in der Übersichtsdarstellung mit SGG, WFP, Connector und LSS.....	101
Abbildung 44: Aufbau dieses Kapitels - Heuristiken zur C&C ² -Modellbildung (HMB)	103
Abbildung 45: Aufbau dieses Kapitels - Inhalt des Kapitels 6.1	104
Abbildung 46: Aufbau des Kapitels	107
Abbildung 47: Bestimmung möglicher WF auf einer Schraube vor Analyse des Einschraubprozesses.....	108
Abbildung 48: Bestimmung der möglichen WF auf dem Bit und dem Recess der Schraube	109
Abbildung 49: gemeinsame Definition der potentiellen WF auf einem mechanischen Dübel.....	110
Abbildung 50: Identifizierung der WFP zwischen Schraube und Magazin	111
Abbildung 51: Identifizierung der WF bzw. WFP zwischen Schraube und der Führungsschiene des Magazins in Beispielsystem 2 anhand der Verschleißspuren (weiß markiert).....	112
Abbildung 52: Verschleiß der Oberfläche als Nachweis für ein WFP zwischen Schraube und Untergrund.....	112

Abbildung 53: Verschleiß unterschiedlicher Bits nach 200 Setzungen	113
Abbildung 54: WFP zwischen Recess und Bits, rechts: WFP, die an der Drehmomentübertragung beteiligt sind	113
Abbildung 55: Sichtbarmachung der WF einer Schraube beim Einschraubvorgang durch weiße Farbe – WF sind dort, wo die weiße Farbe abgetragen wurde.....	114
Abbildung 56: Foto der WFP zwischen Schraubenspitze und Untergrund.....	115
Abbildung 57: Bilder aus Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen des Beispielsystems 1 zwischen Schraube und Untergrund	115
Abbildung 58: Identifikation des WFP A1 zwischen Bit und Recess mittels Röntgenaufnahmen	116
Abbildung 59: Identifizierung des WFP A1 zwischen Bit und Recess mittels CAD Modellen.....	117
Abbildung 60: WFP (schwarz) zw. Schraube, Dichtscheibe und Untergrund (weiß → LSS)	117
Abbildung 61: Simulation des Eindringprozesses zur Identifikation der WFP zwischen Schraube und Untergrund.....	118
Abbildung 62: Schliff einer Schraube im Untergrund.....	119
Abbildung 63: Schliff durch den ODF II, um herauszufinden, welches WFP hier gebildet wird.....	119
Abbildung 64: Schnittmodell eines Porsche auf der North American International Auto Show, Detroit, 2006	120
Abbildung 65: 10-fach vergrößertes Rapid Prototyp Modell des Bits und des Recess	120
Abbildung 66: Aufbau dieses Kapitels.....	121
Abbildung 67: Versagensbild der LSS (Gewindes und Schraubenspitze) weist auf mindestens ein WFP im Einschraubprozess hin	122
Abbildung 68: Die WF im Untergrund als Hinweis, welche LSS der Schraube versagt haben	122
Abbildung 69: versagte LSS (linkes Bild) und WFP zwischen Untergrund und Schraubenkopf (rechtes Bild).....	123

Abbildung 70: Simulation der Beanspruchung der LSS in der Schraube beim Eindringen in den Untergrund	124
Abbildung 71: durch den Dübel induzierte Spannungen im Untergrund	125
Abbildung 72: Aufbau dieses Kapitels.....	126
Abbildung 73: Hochgeschwindigkeits- Videoaufnahmen des Setzprozesses einer Schraube	126
Abbildung 74: Einschraubvorgang der Spitze, zu verschiedenen Zeitpunkten angehalten.....	127
Abbildung 75: Nachstellung des Einschraubprozesses mit einem 10fach vergrößerten Prototyp und Plastilin als Untergrund	128
Abbildung 76: Nachstellung der Funktion „Schraube fällt kopfüber aus dem Magazin“	128
Abbildung 77: Nachstellung einer idealen Vereinzelung und einer Vereinzelung mit einer schräg in den Halter gefallenen Schraube.....	129
Abbildung 78: Nachweis für der Funktion „Drehmoment übertragen“ des WFP A1 ...	130
Abbildung 79: Nachweis für der Funktion „Drehmoment übertragen“ des WFP A1 ...	131
Abbildung 80: Beweis, dass ein WFP an der Funktion beteiligt ist, indem es zerstört wird.....	132
Abbildung 81: Schraubenspitze mit veränderten stofflichen Eigenschaften (Schliffbild)	133
Abbildung 82: Inhalt des Kapitels 6.5	135
Abbildung 83: parallelisierte Aktivitäten bei Systemanalyse mit C&C ² -Ansatz.....	136
Abbildung 84: Ermittlung einer optimalen Gestalteigenschaft anhand der Funktionseigenschaft.....	139
Abbildung 85: mikrogefräster Schraubenprototyp zur Bestimmung der Verknüpfung zwischen Gestalt- und Funktionseigenschaften	141
Abbildung 86: Versuche mit einer vereinfachten Geometrie der Schraubenspitze	142
Abbildung 87: Simulationsversuche mit verschiedenen CAD Modellen der Schraube	143

Abbildung 88: Übersicht zu den Heuristiken in dieser Arbeit	144
Abbildung 89: Aufbau dieses Kapitels.....	145
Abbildung 90: Definition und Validierung der C&C ² -Heuristiken	146
Abbildung 91: Übersicht zu den Projekten im industriellen Umfeld, in denen der C&C ² -Ansatz mit den Heuristiken angewendet wird.....	148
Abbildung 92: erfolgreiche Anwendung der Heuristiken in den Industrieprojekten	149
Abbildung 93: Verwendung und Validierung der Heuristiken in den Diplomarbeiten .	152
Abbildung 94: präsentierte und angewendete Heuristiken in der Schulung	156
Abbildung 95: Bewertung der Schulung und des C&C ² -Ansatzes im Fragebogen.....	157
Abbildung 96: interviewte Personen aus dem industriellen Umfeld	161
Abbildung 97: Beurteilung der interviewten Personen zu C&C ² -Ansatz und Heuristiken	162
Abbildung 98: Workshops in denen die Heuristiken validiert wurden.....	164
Abbildung 99: Anwendung der Heuristiken in den Workshops	167
Abbildung 100: Übersicht zu allen Heuristiken	173
Abbildung 101: Fragebogen der C&C ² -Schulung	174
Abbildung 102: Notenverteilung zum Fragebogen der C&C ² -Schulung.....	175

10 Literaturverzeichnis

Adams 2004 - Adams, M.; Boike, D.: PDMA studies - PDMA foundation CPAS study reveals new trends; 2004

Albers 2010 – Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Process and their Consequences; Konferenz TMCE; Ancona; 2010

Albers et al 1999 - Albers, A.; Birkhofer, H.; & Matthiesen, S.: Neue Ansätze in der Maschinenkonstruktionslehre; Karlsruhe; 1999

Albers et al 2002 - Albers, Albert; Burkhardt, N.; Saak, M.: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode, Konferenz; Ilmenau; 2002

Albers et al 2002b – Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme; Zeitschrift Konstruktion 7; 2002

Albers et al 2004 – Albers, A.; Burkhardt, N.; Ohmer, M.: Principles for design on the abstract level of the Contact & Channel Model C&CM; Konferenz TMCE; Lausanne; 2004

Albers et al 2004b – Albers, A.; Ohmer, M.; Eckert, C.: Engineering design in a different way: cognitive perspective on the Contact & Channel Model Approach; 2004

Albers et al 2005 – Albers, A.; Burkhardt, N.; Ohmer, M.: How C&CM can help the Designer to find the Right Principles; Konferenz CIRP; 2005

Albers et al 2005b – Albers, A.; Burkhardt, N.; Meboldt M.; Saak, M: SPALTEN Problem solving methodology in the product development; Konferenz ICED; Melbourne; 2005

Albers et al 2006 - Albers, A.; Meboldt, M.: A new Approach in Product Development, based on systems engineering and systematic problem solving; Konferenz AEDS; Pilsen; 2006

Albers et al 2007 – Albers, A.; Alink, T.: Support of design engineering activity for a systematic improvement of products; Konferenz CIRP; 2007

Albers et al 2008 – Albers, A.; Deigendesch, T.; Alink T.: Support of design engineering activity – the Contact and Channel Model (C&CM) in the context of problem solving and the role of modelling; Konferenz Design; 2008

Albers et al 2008b - Albers, A.; Alink, T.; Thau, S.; Matthiesen, S.: Support of system analyses and improvement in industrial design through the Contact & Channel Model; Konferenz International Design Conference; 2008

Albers et al 2008c - Albers, A.; Alink, T.; Thau, S.; Matthiesen, S.: Support of design engineering activity through C&CM - temporal decomposition of design problems; Konferenz TMCE; Izmir; 2008

Albers et al 2008d - Albers, A.; Deigendesch, T.; Meboldt, M.: Handling complexity – a methodological approach comprising process and knowledge management; Konferenz TMCE; Izmir; 2008

Albers et al 2009 - Albers, A.; Braun, A.; Clarkson, J.; Enkler, H.-G.; Wynn, D.: Contact and channel modelling to support early Design of technical systems; Konferenz ICED; Dehli; 2009

Albers et al 2009b - Albers, A.; Enkler, H.-G.; Ottnand, J.: Managing Complex Simulation Processes – the Generalized Contact and Channel Model; Zeitschrift; International Journal of Product Development; 2009

Albers et al 2010 - Albers, A.; Düser, T.: A new process for configuration and application of complex validation environments using the example of Vehicle-In-The-Loop at the roller test bench; Konferenz IMECE, Vancouver, 2010

Albers et al 2011 - Albers, A.; Braun, A.: Produktentstehungsprozess für Leichtbaukomponenten und –systeme; Karlsruhe; 2011

Albers et al 2011b - Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.: A new Perspective on Product Engineering Overcoming Sequential Process Models; Karlsruhe; 2011

Albers et al 2011c - Albers A., Enkler H.-G., Ottnad, J.: Managing complex simulation processes - the generalized contact and channel model; Zeitschrift International Journal Product Development, Vol. 13, No. 3; 2011

Albers et al 2013 - Albers A, Sadowski E: The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In: An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations (Hrsg. Blessing, L.T.M.; Chakrabarti, A.). Springer, Heidelberg, 2013

Albers/Matthiesen 2002 - Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und

Synthese technischer Systeme; Zeitschrift Konstruktion Band 54 Heft 7/8; Düsseldorf; 2002

Albers/Matthiesen 2011 – Albers, A.; Matthiesen, S.: Der Contact & Channel – Ansatz (C&C²-A); Wissenschaftliches Seminar am IPEK, KIT; Karlsruhe; 2011

Alink 2010 – Alink, T.: Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz; Karlsruhe; 2010

Ambrosy 1996 - Ambrosy, S.: Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung; Aachen/München; 1996

Aristoteles 1907 – Lasson, A.: Aristoteles Metaphysik, Deutsche Übersetzung; Jena; 1907

Bender 2004 – Bender, B.: Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phase der Produktentwicklung; Dissertation; Berlin; 2004

Berger 1998 – Berger, M.: Effiziente Konzeption von Produktinnovationen; Aachen; 1998

Berth 1992 - Berth, R.: Visionäres Management: Die Philosophie der Innovation; Düsseldorf; 1992

Bierwirth 2011 – Bierwirth, C.: Heuristik, Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik; Europa-Universität Viadrina; Frankfurt; 2011

Blessing et al 2009 – Blessing, L., T., M.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology; London; 2009

Collins 2001 – Collins J.: Good to Great: Why Some Companies Make the Leap...And Others Don't; Zeitschrift Harper Business; 2001

Cooper 2005 - Cooper, R. G.: Your NPD portfolio may be harmful to your business's health; Zeitschrift PDMA Visions; 2005

Daenzer et al 1999 – Dänzer W. F.; Huber, F: Systems Engineering; 1992

DIN-Norm 2330 - Begriffe und Benennungen - Allgemeine Grundsätze; 1993

Debus 2002 – Debus, C.: Routine und Innovation, Management langfristigen Wachstums etablierter Unternehmungen; Marburg; 2002

Deigendesch 2009 – Deigendesch T.: Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel; Karlsruhe; 2009

- Domschke et al 2006** – Domschke, W.; Scholl, A.: Heuristische Verfahren; Jena; 2006
- Dörner 1979** - Dörner, D.: Problemlösen als Informationsverarbeitung; Stuttgart; 1979
- Dörner et al 1998** – Dörner, D.; Frankenberger, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H.: Thought and Design – Research Strategies, Single-case Approach and Methods of Validation; London; 1998
- Dubbel 2005** – Grote K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau; Berlin, Heidelberg, New York; 2005
- Duden** - Die deutsche Rechtschreibung; 1996
- Düser 2010** – Düser, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen; Karlsruhe; 2010
- Eastman 1970** – Eastman, C. M.: On the Analysis of Intuitive Design Process, In: Emerging Methods in Environmental Design von G. Moore; Cambridge; 1970
- Eckert et al 2004** – Eckert, C.; Clarkson, P.; Zanker, W.: Change and customisation in complex engineering domains. Research in Engineering Design; 2004
- Ehrlenspiel 2007** - Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit; München Wien; 2007
- Eligehausen et al 2006** – Eligehausen, R.; Mallée, R.; Silvia, J., F.: Anchorage in Concrete Constructions; Berlin; 2006
- Feldhusen 2010** – Feldhusen J.: Vorlesung „Gestalten als Prozess“ und Vorlesungshandout „Konstruktionslehre 1: Gestalten als Prozess“; 2010; Aachen
- Frankenberger 1997** - Frankenberger, E.: Arbeitsteilige Produktentwicklung – Empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion; Zeitschrift Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 291; Düsseldorf; 1997
- Fricke 1993** – Fricke, G.: Konstruieren als flexibler Problemlösungsprozess – Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren; Düsseldorf; 1993
- Gigerenzer 2008** – Gigerenzer, G.: Bauchentscheidungen - Die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition; New York; 2008
- Gramann 2004** – Gramann, J.: Problemmodelle und Bionik als Methode; 2004

- Greif 1998** – Greif, S.: Patentschriften als wissenschaftliche Literatur; Wissenschaftsforschung Jahrbuch; 1998
- Habermas 1988** - Habermas, J.: Theorie des kommunikativen Handelns; Suhrkamp Verlag; Frankfurt a. M.; 1988
- Hacker et al 1996** - Hacker, W., Sachse, P. & von der Weth, R.: Denkleistungen beim Konstruieren; Zukunftschance Produktentwicklung; VDI-Bericht 1270; Dresden; 1996
- Hars 1994** - Hars, A.: Referenzdatenmodelle - Grundlagen effizienter Datenmodellierung; Wiesbaden, 1994
- Hofmann 2002** – Hofmann, M.: Moderne Heuristik; Vorlesungsskript; Neubiberg; 2002
- Hubka et al 1996** - Hubka, V.; Eder, W.E.: Design Science; London; 1996
- Hussy 1984** – Hussy, W: Denkpsychologie I. Geschichte, Begriffs- und Problemlösungserforschung, Intelligenz, Ein Lehrbuch; Stuttgart; 1984
- Jänsch/Birkhofer 2004** – Jänsch, J; Birkhofer, H.: The gap between learning and applying design methods; Konferenz Design Conference; Dubrovnik; 2004
- Kahnemann et al 1982** - Kahneman, D.; Slovic, P.; Tversky, A.: Judgment under uncertainty: Heuristics and biases; New York; 1982
- Lamnek 2005** – Lamnek, S.: Qualitative Sozialforschung; Weinheim; 2005
- Lemburg 2009** – Limburg J. P.: Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese; Aachen; 2009
- Lindemann 2007** – Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte; Springer; Berlin/Garching; 2007
- Luer/Spada 1992** – Luer, G.; Spada, H.: Denken und Problemlösen; Lehrbuch allgemeine Psychologie; Bern; 1992
- Luhmann 1994** - Luhmann, N.: Die Wissenschaft der Gesellschaft; Frankfurt a. M., 1994
- Marques et al 2009** - Marques P.; Alink T.; Saraiva P.; Albers A.; Requeijo J.; Guerreiro F.: Integration of the contact and channel model with axiomatic design; Konferenz ICAD; 2009

Matthiesen 2002 - Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme; Karlsruhe; 2002

Matthiesen 2011 – Matthiesen, S.: Seven years of product development in industry – experiences and requirements for supporting engineering design with ‚thinking tools‘; Konferenz ICED; Kopenhagen; 2011

Matthiesen et al 2012 – Matthiesen, S.; Ruckpaul, A.: New insights on the contact & channel-approach – modeling of systems with several logical states; Konferenz Design; Dubrovnik; 2012

Meboldt 2008 - Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM); Zeitschrift IPEK Forschungsberichte Nr. 29; Karlsruhe; 2008

Mieg 2000 – Mieg, H. A.: Vom ziemlichen Unvermögen der Psychologie, das Tun der Experten zu begreifen; Konferenz Kongress der deutschen Gesellschaft für Psychologie; Zürich; 2000

Miller 1956 - Miller, G. A.: Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information; Zeitschrift The Psychological Review; 1956

Müller 1970 – Müller, J.: Grundlagen der Systematischen Heuristik, Schriften zur Sozialistischen Wirtschaftsführung; Berlin; 1970

Müller 1985 – Müller, J.: Denkpsychologie und Ingenieurmethodik, Wege zur empirisch fundierten Methodikforschung; Konferenz ICED; 1985

Müller 1990 - Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften; Berlin/Heidelberg; 1990

Müller 2008 – Müller, R: <http://www.muellerscience.com/MODELL/Begriffsgeschichte/ModellgeschichteistKulturgeschichte>

Oerding 2009 – Oerding J.: Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM; Dissertation; Karlsruhe; 2009

Ohmer 2008 – Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM; Karlsruhe; 2008

Pache 2005 – Pache, M.: Sketching for Conceptual Design; München; 2005

- Pahl 1985** – Pahl, G.: Denkpsychologische Erkenntnisse und Folgerungen für die Konstruktionslehre; Konferenz ICED; Hamburg; 1985
- Pahl/Beitz et al 2006** - Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, H.: Konstruktionslehre; Aachen/Magdeburg; 2006
- Pedgley 2007** – Pedgley, O.: Capturing and analysis own design activity; Zeitschrift Design Studies Vol. 28; Leicestershire; 2007
- Phillips 1936** - Phillips, H.: Screw; U.S. Patent #2,046,343; Date issued: 7 July 1936
- Ponn 2007** – Ponn, J.: Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung Technischer Produkte; München; 2007
- Ponn/Lindemann 2008** – Ponn, J; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte; Berlin/Garching; 2008
- Ponn/Lindemann 2011** – Ponn, J; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte; Berlin/Garching; 2011
- Pulm 2004** - Pulm, U.: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung; München; 2004
- Ramström/Rhenmann 1965** – Ramström, D; Rhenmann, E.: A Method of Description the Development of an Engineering Project; 1965
- Reimann 2003** – Reimann U.: Entwicklung einer Skizzendarstellung auf Basis des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen"; Karlsruhe, 2003
- Rodenacker 1991** - Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren; Konstruktionsbücher Band 27; Berlin/Heidelberg/New York; 1991
- Rutz 1985** - Rutz, A.: Konstruieren als gedanklicher Prozess; München; 1985
- Schregenberger 1985** – Schregenberger, J. W.: Neue Impulse für die Konstruktionsmethodik; Konferenz ICED; 1985
- Schumann 2004** – Schumann, M.: Forschungsansätze; Göttingen; 2004
- Schumpeter 1961** - Schumpeter, J.: Konjunkturzyklen; Göttingen; 1961
- Simon 1956** - Simon, H. A.: Rational choice and the structure of the environment; Zeitschrift Psychological Review 63 (2); 1956
- Specht et al 2002** - Specht, G., Beckmann, C. & Amelingmeyer, J.: F&E-Management: Kompetenz im Innovationsmanagement; Stuttgart; 2002

- Stachowiak 1983** – Stachowiak, H.: Modelle – Konstruktion der Wirklichkeit; Fink; 1983
- Streim 1974** – Streim, H.: : Heuristische Lösungsverfahren – Versuch einer Begriffserklärung; Gießen; 1974
- Suh 1990** - Suh, N.P.: The Principles of Design; Oxford; 1990
- Suh 2001** – Suh; N. P.: Axiomatic Design: Advances and Applications; Oxford; 2001
- Thau 2006** – Thau, S.: Analyse des Zusammenhanges zwischen Geometrie und Funktionserfüllung von Trockenbauschraubenspitzen mittels C&CM; Karlsruhe; 2006
- Titzschkau 2005** – Titzschkau, M.: Entwicklung Symbolik zur Darstellung der Eigenschaften von WFP und LSS; Studienarbeit; Karlsruhe; 2005
- VDI 2221** - Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren
- VDI 2223** - Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie 2221, Methodisches Entwerfen technischer Produkte
- Weber 2008** – Weber, C.: How to derive application specific design mythologies; Konferenz Design; Dubrovnik; 2008
- Weisberg 1999** – Weisberg R. W.: Creativity and Knowledge: A Challenge to Theories; Sternberg; 1999
- Weth 1994** – v. d. Weth, R.: Konstruieren – Heuristische Kompetenz, Erfahrungen und individuelle Vorgehen; Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie; 1994
- Wiedner 2013** - Aaron J., Wiedner: Feldstudie zur Identifikation der von Konstrukteuren praktizierten Handlungsmuster bei der Funktion- Gestalt-Synthese
- Woike 2008** - Woike, J., K.: Die paradoxe Rationalität einfacher Heuristiken; Bochum; 2008
- Wulf 2002** – Wulf, J.: Elementarmethoden zur Lösungssuche; Produktentwicklung München, Band 50; 2002
- Zanker 1999** - Zanker, W.: Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden; München; 1999

Diplomarbeiten

Baudy 2010 – Baudy, D.; Co-Betreuer Thau, S.; Betreuer Albers, A.: Aufbau von Grundwissen und Systemverständnis bei Schraubenverbindungen mit Dichtscheibe; Karlsruhe; 2010

Mauz 2008 – Mauz, H.; Co-Betreuer Thau, S.; Alink, A.; Betreuer Albers, A.: New Collation – Entwicklung eines Schraubermagazins und methodische Betrachtung des Prozesses; Karlsruhe; 2008

Schwerdtfeger 2007 – Schwerdtfeger, K. ; Co-Betreuer Thau, S.; Alink, A.; Betreuer Albers, A.: Analyse der Wirkflächenpaare zwischen Bit und Recess unter Verwendung des C&CM am Beispiel der Trockenbauschraube; Karlsruhe; 2007

Weitere Literatur

Albers et al 2003b – Albers, A.; Saak, M.; Burkardt, N.: Methodology in Problem Solving Process; Konferenz 14th International DAAAM Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation; Sarajevo; 2003

Albers et al 2008e – Albers A.; Alink T.: Support of Design Engineering Activity through the Contact and Channel Model – the importance of a Continuous and Systematic Model Building; Konferenz 53rd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium; Ilmenau; 2008

Bircher 2005 – Bircher, M.: Die Integrale Produktinnovation – ein Ansatz zur Unterstützung von Innovationsprojekten; Zürich; 2005

Enkler 2010 - Enkler, H.-G.. Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme; Karlsruhe; 2010

Foerster 1996 – Förster, H.: Wissen und Gewissen. Versuch einer Brücke; Frankfurt a.M.; 1996

Frese 1971 - Frese, E.: Heuristische Entscheidungsstrategien der Unternehmungsführung; Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 23; 1971

Hawkings 2001 – Hawkings, S: Das Universum in der Nussschale; Cambridge; 2001

Hornung 2003 - Hornung, M.: Formulierung von Gestaltungsrichtlinien und Gestaltungsprinzipien unter Berücksichtigung des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“; Karlsruhe; 2003

- Keller et al 2007** – Keller R.; Alink T.; Pfeifer C.; Eckert C.; P. Clarkson J.; Albers A. Product models in design: a combined use of two models to assess change risks; Konferenz ICED; 2007
- Keller/Binz 2009** – Keller A., Binz, H.: Requirements on Engineering Design Methodologies; Konferenz ICED; Stanford; 2009
- Klein 1971** - Klein, H. K.: Heuristische Entscheidungsmodelle. Neue Techniken des Programmierens und Entscheidens für das Management; Wiesbaden; 1971
- Köhler 1921** – Köhler, W.: Intelligenzprüfungen am Menschenaffen; Berlin/Heidelberg; 1921
- Müller et al 1992** – Müller, J.; Praß, P; Beiz, W.: Modelle beim Konstruieren, Konstruktion, Zeitschrift für Produktentwicklung; Band 44; Seite 319 – 324; Springer – VDI – Verlag GmbH & Co. KG; Düsseldorf; 1992
- Schregenberger 1981** – Schregenberger, J. W.: Methodenbewußtes Problemlösen – Ein Beitrag zur Ausbildung von Konstrukteuren; Bern; 1981
- Schumpeter 1912** – Schumpeter, J.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung; Röpke, J & Stiller, O.; Berlin; 1912
- Schyr 2006** - Schyr, C. Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung; Karlsruhe; 2006
- Simon 1993** - Simon, H. A.: Homo rationalis: Die Vernunft im menschlichen Leben; Frankfurt a. M; 1993
- Ulrich 2001** – Ulrich, H.: Systemorientiertes Management; Stuttgart/Bern; 2001
- Von Werder 1995** – von Werder Lutz: Kreatives Schreiben in den Wissenschaften; Berlin; 1995
- Wynn 2009** - Wynn, D.; Albers, A.; Braun, A.: Contact and Channel Modelling to support the design of technical systems; Konferenz ICED; 2009
- Wiest 1966** - Wiest, J.: Heuristic Programs for Decision Making; Harvard; 1966

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sebastian Leonid Thau

Geburtsdatum: 28.06.1980

Geburtsort: München

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Familienstand: Ledig

Bildungsgang

01/2007 – 12/2009 Doktorand am IPEK – Institut für Produktentwicklung am
KIT - Karlsruher Institut für Technologie

05/2006 – 10/2006 Diplomarbeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT
und HILTI, Schaan, Liechtenstein

10/2002 – 10/2006 Fachrichtung Produktentwicklung und Konstruktion

10/2000 – 10/2006 Maschinenbaustudium an der Universität Karlsruhe (TH)
Abschluss als Diplom Ingenieur

02/2004 – 07/2004 Studienarbeit/Tesi am ISTECC, Politecnico di Torino

Berufstätigkeit

Seit 11/2012 Technischer Berater bei Hilti, Kaufering, Deutschland

01/2010 – 10/2012 Technischer Projektleiter bei Hilti, Schaan, Liechtenstein

01/2007 – 12/2010 Entwicklungsingenieur bei Hilti, Schaan, Liechtenstein

08/2005 – 02/2006 Praktikant bei Detroit Diesel/MTU, Detroit, USA

02/2005 – 07/2005 Werkstudent bei Bosch, Stuttgart, Deutschland

07/2000 – 08/2000 Praktikant bei MAN, München, Deutschland

07/1998 – 08/1998 Praktikant bei Columbia-Staver, Wickford, England